

*Lasse Eriksson:*

Oppiva algoritmi rakennuksen lämpötilan ja ilmavirran ohjaukseen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 4.9.2002.

Työn valvoja:



Professori Heikki Koivo

Työn ohjaaja:



TkL Kai Zenger

Tekijä: Lasse Eriksson	
Työn nimi: Oppiva algoritmi rakennuksen lämpötilan ja ilmastuksen ohjaukseen	
Päivämäärä: 4.9.2002	Sivumäärä: 108
Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikka	
Professori: Systeemitieteiden (AS-74)	
Työn valvoja: Professori Heikki Koivo	
Työn ohjaaja: TkL Kai Zenger	
<p>Tässä työssä kuvataan oppiva algoritmi, joka ohjaa rakennuksen lämmitys- ja ilmastuksen ilmastusta ja sisälämpötilaa. Algoritmista esitetään kaksi versiota, jotka soveltuvat vakio- ja muuttuvailmastuksiin järjestelmiin. Työssä esitetään molempien algoritmien toiminnan simulointi VTT:n TRNSYS-simulointiohjelmistolla ja käytännön testaus METOP-matalaenergiatoimistotalossa.</p> <p>Simulointien perusteella on todettu, että talvikauden aikana algoritmeilla voidaan saavuttaa muuttuvailmastuksessa järjestelmässä yli 20 %:n säästö sekä lämpöenergiassa että puhallinmoottorin sähköenergiassa. METOP-talossa tehtyjen kokeiden perusteella säästöjä saavutetaan myös käytännössä, mutta matalaenergiatalossa säästöt saattavat jäädä tavanomaista rakennusta pienemmiksi.</p> <p>Työssä esitellään myös kehitteillä oleva avoin liityntäratkaisu rakennusten toiminnallisuuteen. COBA-arkkitehtuuri (Connected Open Building Automation) perustuu usean suomalaisen yrityksen yhteistyöhön, jonka tavoitteena on luoda rakennuksen Java- ja Linux-pohjainen käyttöjärjestelmä (BOS), jonka kautta rakennus voidaan liittää turvallisesti ja varmasti internetiin. Työssä esitetään, miten kehitetty algoritmi liitetään toimistorakennukseen, jossa COBA otetaan ensimmäisten joukossa käyttöön vuoden 2002 aikana.</p>	
Avainsanat: Oppiva, lämmitysjärjestelmä, säätö, avoin, rakennus, RUSE	



Author: Lasse Eriksson	
Name of the Thesis: Learning algorithm in building temperature and air flow control	
Date: 4.9.2002	Number of pages: 108
Department: Department of Electrical and Communications Engineering	
Professorship: Control Engineering (AS-74)	
Supervisor: Professor Heikki Koivo	
Instructor: Lic. Sc. (Tech) Kai Zenger	
<p>A new learning algorithm that controls the heating air flow and indoor temperature in buildings is presented in this study. Two versions of the algorithm are presented, one for systems with constant air flow and the other for systems with variable air flow. Both algorithms have been tested with the TRNSYS simulation tool at VTT, the Technical Research Centre of Finland, and in a real low-energy building, METOP, Espoo, Finland. The test results and simulations are presented in this study.</p> <p>According to the simulations it is possible to save over 20 % of the heat energy and of the fan's electric energy during wintertime in variable air flow systems. Tests at the METOP building showed that savings are possible, but in low-energy buildings they may be smaller than in ordinary buildings.</p> <p>A new interface solution to building functionality, which is under development, is also presented. This COBA architecture (Connected Open Building Automation) is a result of co-operation between several Finnish companies. The goal in COBA is to create a building's operation system (BOS) based on Java and Linux technologies. With BOS it is safe and secure to connect the building into the Internet. The thesis also discusses how the developed algorithm is to be implemented in an office building, in which the COBA system will be introduced during 2002.</p>	
Keywords: Learning, heating system, control, open, building, RUSE	

## Alkulause

Tämä diplomityö on tehty Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen rakennus- ja yhdyskuntatekniikan RUSE-tutkimusprojektiin Teknillisen korkeakoulun systeemitekniikan laboratoriossa. RUSE:ssa tutkittiin rakennusten uusia säätö- ja energianhallintaratkaisuja.

Liityin RUSE-projektin tutkimusryhmään vuoden 2001 alussa, kun tulin töihin systeemitekniikan laboratorioon. Siinä vaiheessa ”älykkästä lämpötilan säätimestä”, kuten algoritmia ensin kutsuttiin, oli kehitetty ensimmäinen, vakioilmavirtaisen järjestelmän ohjaukseen tarkoitettu versio. Algoritmin kehittivät Sami Karjalainen VTT:ltä ja Jani Kaartinen systeemitekniikan laboratoriosta. Minun haasteeni oli sovittaa algoritmi todelliseen koekohteeseen ja jatkokehitystäkin piti tehdä.

Vuoden 2001 aikana työskentelin yhdessä Samin kanssa, ja haluankin kiittää häntä mukavasti sujuneesta yhteistyöstä. Haluan myös kiittää VTT:ltä projektipäällikkö Satu Paihoa mahdollisuudesta tämän työn tekemiseen. Lisäksi systeemitekniikan puolelta kiitoksen sanan saavat professori Heikki Koivo työn valvonnasta ja työpaikan suomisesta, yliassistentti Kai Zenger työn ohjaamisesta, Jani Kaartinen neuvoista teknisissä vaikeuksissa projektin aikana sekä työhuoneen TA142 porukka loistavasta yhteishengestä ja ilmapiiristä. Kiitos teille!

En voi kiittää tarpeeksi kihlattuani Anni-Kaisaa tämänkin työn aikana saamastani tuesta ja ymmärryksestä.

Espoossa 4.9.2002



Lasse Eriksson

# Sisällysluettelo

Alkulause.....	iii
Sisällysluettelo.....	iv
Symboli- ja lyhenneluettelo.....	vi
1 Johdanto.....	1
2 Katsaus Suomen rakennuskantaan.....	4
2.1 Asuminen.....	4
2.2 Rakennusten lämmitys.....	4
2.3 Lämmitysjärjestelmät.....	5
2.4 Suomen rakennusmääräyksistä.....	6
2.4.1 Rakennuksen lämpöolot.....	7
2.4.2 Sisäilman puhtaus.....	7
2.4.3 Ilmanvaihto.....	8
2.5 Energian säästöpotentialin arviointi.....	9
3 Rakennuksen dynamiikka.....	11
3.1 Lämmön siirtyminen.....	11
3.2 Rakennuksen energiatase.....	13
3.3 Rakenteiden dynamiikka.....	15
4 Rakennusautomaatiojärjestelmät.....	19
4.1 Rakennuksen järjestelmät.....	19
4.2 Rakennusautomaatiojärjestelmät.....	19
4.3 Kenttäväylät.....	21
4.4 Käyttöliittymä.....	26
4.5 COBA.....	27
5 Läsäolon tunnistaminen rakennuksessa.....	30
5.1 Läsäolon mittaaminen.....	30
5.2 Läsäoloanturit.....	30
5.3 Muut läsäolon mittausmenetelmät.....	31
6 Oppiva algoritmi vakioilmavirtaiseen järjestelmään.....	32
6.1 Algoritmin kuvaus.....	32
6.2 Simuloinnit TRNSYS-ohjelmistolla.....	36
6.2.1 Simuloinnin kuvaus.....	36
6.2.2 Simulointitulokset.....	37



6.3	Tulokset koekohteesta .....	42
6.3.1	METOP-matalaenergiatoimistotalo .....	42
6.3.2	Oppivan algoritmin testaaminen .....	43
6.3.3	Testitulokset .....	45
6.3.4	Johtopäätökset .....	51
7	Oppiva algoritmi muuttuvailmavirtaiseen järjestelmään .....	53
7.1	Algoritmin kuvaus .....	54
7.1.1	Palautuslämmityksen ennakkokäyrä .....	55
7.1.2	Palautuslämmitysjajan arviointi .....	57
7.1.3	Lämpötilan ja puhallinnopeuden asetusarvojen laskenta .....	58
7.1.4	Oppimisen periaatteet .....	59
7.1.5	Pienimmän neliösumman menetelmä .....	63
7.1.6	Painotettu pienimmän neliösumman menetelmä .....	66
7.1.7	Viihtyvyys rakennuksessa .....	67
7.2	Simuloinnit TRNSYS-ohjelmistolla .....	67
7.2.1	Simuloinnin kuvaus .....	67
7.2.2	Simulointitulokset .....	68
7.3	Tulokset koekohteesta .....	73
7.3.1	Algoritmin testaaminen koekohteessa .....	73
7.3.2	Testitulokset .....	74
7.3.3	Ennakkokäyrän muuttuminen .....	80
8	Energiankulutuksen laskelmat .....	83
8.1	Energiankulutuksen arviointi Metop-talon kokeiden tuloksista .....	83
8.2	Rakennuksen mallin simulointi .....	86
9	Lopputulokset .....	91
10	Johtopäätökset .....	93
	Lähdeluettelo .....	96
	Liite 1: Oppivan algoritmin liittäminen Lintulahdenkuja 6:n avotoimistotilaan – toimintaselostus .....	100

## Symboli- ja lyhenneluettelo

### *Symbolit:*

$A_i$	pinnan $i$ pinta-ala [ $m^2$ ]
$c_p$	ominaislämpökapasiteetti [ $Jkg^{-1}K^{-1}$ ]
$C$	lämpökapasiteetti [ $JK^{-1}$ ]
$\dot{C}_T$	tuloilman kapasitiivinen virta [ $JK^{-1}s^{-1}$ ]
$\dot{C}_P$	poistoilman kapasitiivinen virta [ $JK^{-1}s^{-1}$ ]
$d$	rakenteen paksuus [m]
$e$	virhevektori
$e_i$	mittausvirhe
$h$	lämpötilan asetusarvon päivitysväli [h]
$h_p$	ajanhetki [h]
$J$	kustannusfunktio
$k$	aikaindeksi
$k_i$	pinta-alaa $A_i$ vastaavan rakenteen $k$ -arvo [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]
$k_j$	parametri PNS-menetelmässä ( $j = 0, 1, 2, \dots$ )
$K$	rakenteiden lämmönjohtumista kuvaava parametri [ $WK^{-1}$ ]
$K_p$	$k$ -profiilin arvo
$L$	mittausten lukumäärä
$m$	lämpövastus [ $Km^2W^{-1}$ ]
$m_o$	rakenteen lämpövastus sisäpinnasta ulkopintaan [ $Km^2W^{-1}$ ]
$m_s$	rakenteen sisäpinnan lämpövastus [ $Km^2W^{-1}$ ]
$m_u$	rakenteen ulkopinnan lämpövastus [ $Km^2W^{-1}$ ]
$M$	lämpötilan asetusarvon päivityskertojen lukumäärä käyttäjän poissaolojakson aikana
$n$	ilmanvaihtokerroin [ $1/h$ ]
$N$	pienimmän neliösumman menetelmässä sovitettavan käyrän asteluku
$q$	lämpövirta [ $Wm^{-2}$ ]
$q_c$	pinnasta konvektiolla ilmaan siirtyvä lämpövirta [ $Wm^{-2}$ ]
$q_r$	pinnasta heijastuva säteily [ $Wm^{-2}$ ]
$q_s$	säteilyteho [ $Wm^{-2}$ ]



$q_{sw}$	pintaan tuleva säteily [ $Wm^{-2}$ ]
$q_t$	pinnan läpi johtuva lämpövirta [ $Wm^{-2}$ ]
$q_v$	tilavuusvirta [ $m^3 s^{-1}$ ]
$Q$	kokonaislämmitysteho [W]
$Q_{kuorma}$	rakennuksen sisällä kehittyvä teho, lämpökuorma [W]
$Q_{lämm}$	rakennuksen lämmitysjärjestelmän teho [W]
$T$	lämpötila [ $^{\circ}C$ ] tai [K]
$T_{as}$	sisälämpötilan asetusarvo [ $^{\circ}C$ ]
$T_{ekv}$	ekvivalentti ulkolämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_o$	rakenteen lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_{pinta(i)}$	pinnan i lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_{pt}$	sisälämpötilan asetusarvo rakennuksen käyttäjän poissaoloaikana [ $^{\circ}C$ ]
$T_{sisä}$	sisäilman lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_{sp}$	sisäpinnan lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_u$	ulkolämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_v$	vastasäteilyn lämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$u_s$	rakenteen sisäpuolen pinnan yhdistetty konvektion ja säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [ $Wm^{-2} K^{-1}$ ]
$u_{sät}$	rakenteen ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [ $Wm^{-2} K^{-1}$ ]
$u_u$	rakenteen ulkopuolen pinnan yhdistetty konvektion ja säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [ $Wm^{-2} K^{-1}$ ]
$V$	tilavuus [ $m^3$ ]
$w_j$	mittauksen painotuskerroin
$\alpha$	absorptiokerroin
$\varepsilon$	emissiviteetti
$\phi^T$	regressorivektori
$\kappa$	heijastuskerroin
$\lambda$	materiaalin lämmönjohtavuus [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]
$\theta$	parametrivektori
$\rho$	tiheys [ $kgm^{-3}$ ]
$\sigma$	vakio $5,67 \cdot 10^{-8}$ [ $Wm^{-2}K^{-4}$ ]

$\tau$	läpäisykerroin
$\Delta T$	lämpötilaero [°C]
$Y$	mittausvektori
$\Psi$	regressorimatriisi

***Lyhenteet:***

BOS	Building operation system
COBA	Connected open building automation
DDC	Direct digital control, suora digitaalinen säätö
DLL	Dynamic link library, dynaaminen kirjasto, ohjelmistokomponentti
EHS	European home systems
EIB	European installation bus
LVIS	Lämmitys-, vesi- ja viemäröinti-, ilmanvaihto- ja ilmastointi, sähkö- ja säätöprosessit (engl. HVAC)
METOP	Matalaenergiatoimistotalo (VTT:n koetalo)
PNS	Pienimmän neliösumman menetelmä
PPNS	Painotettu pienimmän neliösumman menetelmä
RAU	Rakennusautomaatio, rakennusautomaatiojärjestelmä
RAKLI	Suomen toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI ry
SaMBA	Smart and modular building automation
TRNSYS	The transient energy system simulation tool
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus

# 1 Johdanto

Energiankulutuksen vähentäminen on yksi tärkeimmistä keskustelun aiheista maailmanlaajuisesti. Kulutuksen vähentämistä motivoivat useat seikat, joista tärkeimpiä ovat tuotannossa syntyvät päästöt, energian hinta ja pelko energiavarojen loppumisesta (Roaf ja Hancock 1992).

Energiankulutuksen optimoinnista on tullut osa rakennusten perussuunnittelua. Lainsäädäntö ja yleinen mielipide kannustavat rakentamaan vähemmän kuluttavia rakennuksia. Tavallisesti paremman energiatalouden edellytys on rakennuksen tiiviiden parantaminen. Tiiviiseen rakennukseen liittyy kuitenkin ilmanvaihtoa koskevia ongelmia. Luonnollinen ilmanvaihto ei riitä pitämään hyvin eristetyn rakennuksen sisäilman laatua siedettävällä tasolla, vaan tarvitaan koneellista ilmanvaihtoa. Riittävän viihtyvyyden ja ilmanvaihdon sekä pienten energiahäviöiden takaamiseksi rakennuksen ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmiä tulee ohjata älykkäästi (Lauckner *et al.* 2001).

Osa rakennuksen suunnittelua on lämmitysjärjestelmän valinta, johon oleellisesti kuuluu järjestelmän eri palvelujen arviointi. Tietokone- ja tietoliikenneteknologioiden valtaisa kehitys tarjoaa uusia ratkaisuja myös rakennusautomaatioon. Tiedonsiirron uudet menetelmät ovat löytämässä tiensä myös rakennuksen sisälle. Lyhyen etäisyyden langattomat tiedonsiirtoteknologiat, kuten Bluetooth, liitettynä esimerkiksi matkapuhelimiin, tuovat älyä rakennusten hallintaan. Erilaiset käyttäjän läsnäolosta riippuvat sovellukset yleistyvät näiden tekniikoiden myötä. Tosin tulevaisuudessakin osa rakennuksen tiedonsiirrosta pysyy hitaana ja pienimuotoisena, koska etenkin pienten, yksityisten rakennusten kohdalla kustannuskriittisyys on merkittävä tekijä. Erilaiset rakennuksen ulkopuoliset tietoliikenneyhteydet helpottavat rakennuksen hallintaa, valvontaa ja järjestelmien ohjausta (Pakanen 1998).

Kehittyvä tekniikka tuo mukanaan myös pelkoja. Kauppalehti (19.11.2001) kertoo suomalaisesta ”Kuluttajatutkimukset”-hankkeen ”Älykäs koti”-tutkimuksesta, jossa haastateltiin 20 kotitaloutta ja 51 henkilöä. Tulosten mukaan tutkimuksessa älykkäältä kodilta haluttiin muun muassa energian ja rahan säästöä tekniikan avulla, turvallisuuden lisääntymistä, kommunikaatioyhteyksiä, mutta samalla mahdollisuutta säilyttää kontrolli tekniikan toiminnan yläpuolella. Kuitenkaan älykäs koti ei saa edellyttää laitteiden kiinnittämistä iholle, sen ei tule olla valvova isovelji tai ulkopuolinen kontrolloija, eikä se saa sekoittaa työtä ja vapaa-aikaa. Kaiken kaikkiaan uuden tekniikan tulee toimia näkymättömissä, mutta sen tuoma hyöty voi tuntua esimerkiksi lämmityskustannusten laskuna.

Rakennuksen energianhallintaan on kehitetty erilaisia menetelmiä, jotka tavalla tai toisella minimoivat energiankulutuksen. Koska rakennuksen käyttäjä ei kuitenkaan salli viihtyisyyden huononemista energiansäästön takia, tämä seikka tulee tarkoin huomioida energianhallintaa koskevissa teknisissä ratkaisuisissa. Optimointia vaikeuttaa edelleen se, että rakennuksen sisälämpötilaan ja ilmanlaatuun voidaan vaikuttaa hyvin hitaasti. Tämän takia tutkimusten kohteena ovat olleet erilaiset prediktiiiviset säätöjärjestelmät, joissa käytetään hyväksi esimerkiksi sääennustusta tai aiempia tietoja rakennuksen lämpökuormien käyttäytymisestä (Gruber *et. al* 2001).

Eräs lähestymistapa energiankulutuksen pienentämiseksi on kehittää järjestelmiä, joissa sisäilman lämpötilaa voidaan laskea silloin, kun rakennuksessa ei oleskella. Jotkut rakennukset ovat aktiivisessa käytössä vain noin 30 % vuodesta. Tällaisissa rakennuksissa voidaan hyvällä lämmitysjärjestelmän hallinnalla saavuttaa merkittäviä säästöjä. Toimistorakennusten kohdalla käytäntö on nykyisin se, että lämpötilan annetaan laskea, kun työpäivä päättyy, ja lämmitys aloitetaan hieman ennen seuraavan työpäivän alkua. Ongelmana on, että lämpötilan ohjaus seuraa aikaohjelmaa, joten on mahdollista, että viihtyisyys rakennuksessa kärsii. Tästä syystä lämpötilaa ei uskalleta laskea tarpeeksi ja säästöt jäävät pieniksi. Virgone ja Fraisse (2001) esittelevät säätimen, joka palauttaa säästöjakson jälkeen lämpötilan normaaliksi ennen rakennuksen käyttäjien saapumista. Säädin laskee sumeaaan logiikkaan perustuen optimaalisen lämmitysajan, jotta sisälämpötila saavuttaisi vaaditun tason tiettyyn aikaan mennessä.



Tässä työssä esiteltävä algoritmi ohjaa lämmitysjärjestelmää rakennuksen käyttäjän läsnäolon perusteella. Algoritmin avulla voidaan säästää rakennuksen lämmityskustannuksissa. Algoritmi on kehitetty osana Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) ”Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut”-projektia (RUSE), jossa tutkittiin talotekniikkajärjestelmien säätöratkaisuja sekä rakennusten kokonaisenergianhallintamenetelmiä. Tutkimusta tehtiin VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa ja Teknillisen korkeakoulun systeemitekniikan laboratoriossa ja valaistuslaboratoriossa. Algoritmin kehittämiseen osallistuivat VTT:ltä DI Sami Karjalainen ja TKK:lta tekn. yo. Lasse Eriksson (muuttuvailmavirtaisen järjestelmän algoritmi) sekä DI Jani Kaartinen (vakioilmavirtaisen järjestelmän algoritmi). Ohjelmointivastuu algoritmien osalta oli TKK:lla.

Työssä luodaan ensin katsaus Suomen rakennuskantaan ja arvioidaan rakennustyypeittäin energiansäästöpotentiaalia. Rakennuksen dynaamisia ominaisuuksia tarkastellaan ja lämmitysongelmaa lähestytään matemaattiselta pohjalta. Työssä perehdytään myös rakennusautomaatiojärjestelmien perusratkaisuihin ja tulevaisuuden näkymiin (COBA). Algoritmin osalta kuvataan sen molempien versioiden rakenne, ominaisuudet, toiminta, simuloinnit ja todellisen koekohteen tulokset. Lopuksi analysoidaan energiankustannuksen säästöjä koekohteessa. Liitteessä 1 esitetään lisäksi toteutussuunnitelma algoritmin liittämiseksi suureen toimistorakennukseen, jonka rakennusautomaatiojärjestelmän valvomo ja liitännät on toteutettu COBA-ympäristössä.



## 2 Katsaus Suomen rakennuskantaan

### 2.1 Asuminen

Vuoden 1997 lopussa Suomessa oli lähes 2,5 miljoonaa asuntoa vuotuisen asuntokannan kasvun ollessa noin 30000 asuntoa. Asunnot jakautuvat rakennustyypeittäin taulukon 1 mukaisesti. Valmistuvan asuinhuoneiston pinta-ala on keskimäärin 81,8 m<sup>2</sup> ja kaikkien asuinhuoneistojen keskimääräinen pinta-ala on 76 m<sup>2</sup> (Tilastokeskus 1999).

*Taulukko 1: Suomen asuntokanta rakennustyypeittäin v. 1997 (Tilastokeskus 1999).*

Rakennustyyppi	Asuntoja rakennuksissa (lkm)	Osuus asuntokannasta (%)
Erillinen pientalo	981 000	41
Rivitalo	307 000	13
Kerrostalo	1 053 000	46

Rakennuksia on Suomessa 1,25 miljoonaa, joiden lisäksi noin 430000 kesämökkiä sekä tilastoimaton, suuri määrä piha- ja talousrakennuksia ja maatalouden tuotantorakennuksia. Rakennuskannasta 86 % on asuinrakennuksia.

### 2.2 Rakennusten lämmitys

Rakennukset voidaan jaotella lämmitysaineen perusteella. Taulukkoon 2 on merkitty rakennusten lämmitysaineet ja niiden prosenttiosuudet kaikista rakennuksista. Tilasto on vuodelta 1997 (Tilastokeskus 1999). Asuinrakennusten kohdalla prosenttiosuudet ovat likimain samoja. Kauko- ja aluelämmön osuus on säilynyt samana viimeisen vuosikymmenen ajan. Öljyn osuus on ollut laskussa. Vuodesta 1970 öljylämmityksen osuus kaikista rakennuksista on pudonnut kolmanneksen. Öljylämmityksestä on siirrytty pääasiassa sähkölämmitykseen. Myös puu- ja turvelämmityksen osuus on pienentynyt merkittävästi kolmen viime vuosikymmenen aikana.

*Taulukko 2: Rakennukset lämmitysaineen mukaan v. 1997 (Tilastokeskus 1999).*

Lämmitysaine	Osuus (%)
Kauko- tai aluelämpö	9,9
Öljy, kaasu	25,4
Kivihiili, koksi	0,7
Sähkö	34,3
Puu, turve	24,0
Muu, tuntematon	5,8

On tarpeen jaotella rakennukset myös lämmitystavan perusteella. Taulukko 3 esittää kaikkien rakennusten jakoa lämmitystavan mukaan. Uuni- ja kaminalämmityksestä on siirrytty 1960-luvulta lähtien (osuus v.1960 83,3 %) sähkö- tai keskuslämmitykseen.

*Taulukko 3: Rakennukset lämmitystavan mukaan v. 1997 (Tilastokeskus 1999).*

Lämmitystapa	Osuus (%)
Keskuslämmitys	51,1
Sähkölämmitys	29,6
Uuni- tai kaminalämmitys	15,9
Muu lämmitystapa (sis. tuntemattoman)	3,4

### 2.3 Lämmitysjärjestelmät

Rakennuksissa käytettävistä lämmönjakojärjestelmistä esitellään lyhyesti vesikeskuslämmitys-, ilma- ja ilmanvaihtolämmitys- sekä tilakohtainen sähkölämmitysjärjestelmä. Lämmönjakojärjestelmät ovat toteutukseltaan hyvin erilaisia. Järjestelmän valintaan liittyy aina rakennuskohtaisten kokonaiskustannusten arviointi.

Vesikeskuslämmitysjärjestelmässä lämmitettyä vettä kierrätetään tilakohtaisissa radiaattoreissa tai lattialämmitysputkistoissa. Radiaattorit tai lattialämmityselementit luovuttavat lämpöä ilmatilaan. Kiertoveden lämmönlähde voidaan valita vapaasti.

Ilma- tai ilmanvaihtolämmitysjärjestelmässä ilmatila lämmitetään suurella ilmamäärällä. Ilmalämmitysjärjestelmässä ilma lämmitetään keskitetysti esimerkiksi vesipatterilla tai sähkövastuksilla. Lämmin ilma johdetaan huoneisiin ikkunoiden alla olevien säleiköiden kautta. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmään kuuluu lämmöntalteenotolla varustetut tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmät. Tuloilmaelementit sijoitetaan huonetilan seinämille tai kattoon. Matalaenergiatalot varustetaan aina lämmöntalteenoton sisältävällä ilmanvaihtojärjestelmällä. Tämän ja matalaenergiatalojen pienen lämpöenergiatarpeen vuoksi ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä voi soveltua erittäin hyvin matalaenergiataloihin. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän etuna voidaan pitää myös mahdollisuutta säätää tilakohtaisesti lämpötilaa esimerkiksi huonekohtaisilla lämmityselementeillä (Virtanen 1999).

Sähkölämmitysjärjestelmä koostuu erikseen säädettävistä tilakohtaisista sähköpattereista. Mikäli järjestelmä varustetaan varaajalla, voidaan hyödyntää usein edullisempaa yösähköä. Järjestelmän investointikustannukset ovat edulliset.

Älykkään ohjauksen kannalta sähkö- ja ilmanvaihtolämmitysjärjestelmät ovat helpoimpia hallita. Jos tavoitteena on säästää lämpöenergian kustannuksissa kytkemällä lämmitys pois päältä tietyksi ajaksi, lämpöä varaamattomat järjestelmät ovat parhaiten ohjattavissa. Jos lämpöä varataan, pitäisi rakennuksen aktiivisen käytön loppumista ennustaa, jotta varaajassa oleva energia voidaan hyödyntää ennen säästöjaksoa.

## **2.4 Suomen rakennusmääräyksistä**

Tässä kohdassa käsitellään Ympäristöministeriön suosituksia ja määräyksiä rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Keskeiset sisäilmastoon ja ilmanvaihtoon liittyvät termit määritellään seuraavasti (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2 1987):



- ilmanvaihto
  - ilmanvaihdoilla tarkoitetaan yleisesti huoneilman laadun ylläpitämistä ja parantamista huoneen ilmaa vaihtamalla
- ilmastointi
  - ilmastoinnilla tarkoitetaan huoneilman puhtauden, lämpötilan, kosteuden ja ilman liikkeen hallintaa tulo- ja kierrätysilmaa käsittelemällä
- oleskeluvyöhyke
  - oleskelutila on tila, joka rajoittuu alhaalla lattiatasoon, ylhäällä 1,8 metrin korkeudelle lattiasta ja sivusuunnassa 0,6 metrin päähän seinistä tai muista vastaavista kiinteistä rakennusosista

#### **2.4.1 Rakennuksen lämpöolot**

Rakennuksille on annettu rakentamismääräyskokoelmassa sisäilman lämpötilan ohjearvoja, jotka vaihtelevat rakennustyypeittäin ja vielä rakennuksen sisällä tilakohtaisesti. Lämpötilan ohjearvo voidaan alittaa, jos ulkoilman lämpötila alittaa paikkakuntaakohtaisen mitoitustilalämpötilan. Lämpötilan alentaminen käyttöajan ulkopuolella selvitetään tapauskohtaisesti. Ohjearvot voidaan ylittää lämmityskautena vain painavista syistä, jotta välttyään tarpeettomalta energiankulutukselta.

Rakennuksen ollessa käytössä oleskeluvyöhykkeen lämpötila ei saa ylittää +27 °C. Kun ulkoilman lämpötila ylittää +22 °C, voi sisäilman lämpötila ylittää ulkolämpötilan viiden tunnin maksimijakson keskiarvon korkeintaan 5 °C. Tästä voidaan poiketa asuinrakennuksissa.

#### **2.4.2 Sisäilman puhtaus**

Sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien tulee tavanomaisissa tiloissa alittaa taulukon 4 esittämät viranomaisten määräämät maksimi-arvot. Hiilidioksidin pitoisuuden tulee lisäksi olla alle 2500 ppm, josta ihmisperäisen hiilidioksidin osuus saa olla enintään 1500 ppm. Mikäli ulkoilmavirtaa säädetään sisäilman pitoisuuden perusteella, käytetään säätöarvoa 800 ppm ( $\text{cm}^3/\text{m}^3$ ).

*Taulukko 4: Sisäilman epäpuhtauspitoisuuksien ylärajat (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2 1987).*

Epäpuhtaus	Yksikkö	Vuosikeskiarvo	Vuorokausikeskiarvo	Tuntikeskiarvo
Rikkidioksidi	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	40	200	500
Typpidioksidi	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		150	300
Hiilimonoksidi	$\text{mg}/\text{m}^3$		10 <sup>1)</sup>	30
Hiukkaset	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	60	150	

1) 8 h:n keskiarvo

### 2.4.3 Ilmanvaihto

Normaalikorkuisten huoneiden ilmanvaihтокertoimen tulee olla suurempi kuin 0,5 l/h. Ilmavirran vähimmäismäärä tilassa riippuu myös ilman tilavuudesta henkilöä kohden. Mitä enemmän tilassa on ilmaa henkilöä kohden, sitä vähemmän ilmaa tarvitaan henkilöä kohden sekunnissa, kuitenkin vähintään 4 dm<sup>3</sup>/s/hlö (tilat, joissa ei tupakoida). Rakentamismääräyksen mukaisia ohjearvoja suurempia arvoja tulisi käyttää

- riittävän jäähdytys- tai lämmitystehon saavuttamiseksi
- normaalia suurempien toimintojen aktiviteetin tai hajuintensiteetin takia
- normaalia suuremman kosteus- tai epäpuhtausmäärän poistamiseksi
- hyvän ilmanjaon turvaamiseksi ja
- kohdepoistojen mitoituksen perusteella.

Kun ulkoilman lämpötila on enintään 15 °C korkeampi kuin paikkakunta-kohtainen mitoituslämpötila, voidaan lämmityslaitteiden mitoitus- ja lämmitystehon pienentämiseksi tilakohtaisia ilmavirtaohjearvoja pienentää tilapäisesti 50 %, jos tästä ei aiheudu ilmeistä terveydellistä tai muuta haittaa. Asuntojen ilmavirtojen osalta voidaan pienentää vain poistoilmavirtoja. Taulukkoon 5 on kerätty rakentamismääräyskokoelmasta tämän työn kannalta oleellisia ohjearvoja.



*Taulukko 5: Tilakohtaisia ohjearvoja sisäilmastolle ja ilmanvaihdolle (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2 1987).*

Tila	Lämpötila [°C]	Ilmanvaihto- kerroin [1/h]	Ilmamäärä [dm <sup>3</sup> /s/hlö]	Ilmamäärä [dm <sup>3</sup> /s/m <sup>2</sup> ]
<b>Asuinrakennukset</b>				
Olohuone	21	0,5		
Makuuhuone	21		4	
<b>Toimistorakennukset</b>				
Avokonttori	21		10	1,5
Toimistohuone	21		10	1
Neuvotteluhuone	21		10	4

## 2.5 Energian säästöpotentiaalin arviointi

Pelkästään kotitaloudet kuluttavat rakennusten lämmitykseen ja kotitaloussähköön 15 % Suomessa vuosittain tuotetusta energiasta. Huonetilan lämmityksen osuus tästä on 54 % (<http://www.motiva.fi/>). Rakennukset eivät kuitenkaan ole jatkuvasti käytössä, vaan käyttöaste vaihtelee vuositasolla 30 – 100 %. Sisälämpötilan laskemisella 1 °C saavutetaan noin 5 %:n säästö lämpöenergiankulutuksessa. Tästä voidaan päätellä, että Suomen rakennuskannassa piilee mahdollisuus säästää merkittävästi lämpöenergiassa, mikäli huonelämpötilaa voidaan tiettyinä aikoina laskea.

Etenkin toimistorakennuspuolella sisäilman lämpötilaa voidaan pudottaa yleensä yöaikaan. On kuitenkin pidettävä huoli siitä, että palautuslämmitys aktivoidaan riittävän aikaisin, jotta toimistotilat ovat lämmentyneet ennen ensimmäisen työntekijän saapumista aamulla. Asuntoapuolella tilanne on hieman toinen. Kerrostaloissa on käytännössä aina jossakin huoneistossa joku läsnä eikä huoneistokohtainen, tietokoneella ohjattu lämpötilan säätö yleensä onnistu. Toimistorakennusten lisäksi omakoti- ja rivitalot soveltuvat lämpötilan säätelyyn läsnäolotiedon perusteella. Sovelluskohteita arvioitaessa oleellinen asia on rakennuksen käyttöaste. Mikäli rakennus on paljon käytössä, ei sisälämpötilan laskulla saavuteta kuin huonontunutta viihtyisyyttä. Pienellä käyttöasteella, jos läsnäolo on kuitenkin säännöllistä, voidaan lämmityskustannuksissa säästää merkittävästi viihtyisyyden kärsimättä.

Rakennuskannan perusteella Suomessa on mahdollisuus säästää lämpöenergiassa lämpötilan älykkäällä ohjauksella. Säästöjen suuruus riippuu rakennuksen käyttöasteen lisäksi käytön säännöllisyydestä tai sen ennustettavuudesta. Lisäksi rakennuksen lämmitysjärjestelmällä on merkitystä sovellusta kehitettäessä. Tässä työssä kuvattavasta lämpötilan ja ilmapirran ohjaukseen suunnitellusta algoritmista on pyritty tekemään mahdollisimman moneen rakennustyyppiin ja lämmitysjärjestelmään sopiva. Seuraavissa luvuissa perehdytään rakennuksen dynamiikkaan yleisesti ja esitellään sopivia ympäristöjä algoritmin toimintapohjaksi. Lisäksi analysoidaan läsnäolon ennustamista, joka muodostuu keskeiseksi ongelmaksi tällaisia sovelluksia kehitettäessä.

### 3 Rakennuksen dynamiikka

Ennen algoritmin esittelyä työssä selvitetään rakennuksen dynamiikkaa ja lämmön ominaisuuksia. Näiden lähinnä matemaattisten tarkasteluiden pohjalta algoritmin tuomia energiansäästöjä arvioidaan luvussa 8.

#### 3.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö voi siirtyä kolmella tavalla paikasta toiseen (kts. esim. Björkholtz 1987)

- johtumalla,
- säteilemällä ja
- konvektion avulla.

Johtumisessa liike-energiaa siirtyy molekyylistä toiseen. Siirtymisen vuoksi puhutaankin lämmön virtauksesta. Lämpö pyrkii tasoittumaan esimerkiksi rakennuksen seinämän molemmiin puolin siten, että lämpöä siirtyy lämpimämmästä tilasta kylmempään (Suomessa yleensä rakennuksen sisätiloista ulkoilmaan). Lämpövirta  $q$  seinämän läpi voidaan laskea kaavasta (1)

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (1)$$

jossa

- |             |   |
|-------------|---|
| $\lambda$   | kappaleen (rakennuksen seinämän) lämmönjohtavuus [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ], |
| $T_1 - T_2$ | lämpötilaero kappaleen yli [K] ja   |
| $d$         | kappaleen (seinämän) paksuus [m].   |

Säteilemällä lämpö siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen muodossa. Jokainen kappale, jonka lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella ( $-273,15\text{ °C}$ ), lähettää säteilyä. Kappaleen säteilyteho  $q_s$  on verrannollinen kappaleen lämpötilan neljänteen potenssiin kaavan (2) mukaan.

$$q_s = \varepsilon \sigma T^4, \quad (2)$$

jossa

$q_s$	säteilyteho [ $\text{Wm}^{-2}$ ],
$\varepsilon$	kappaleen emissiviteetti,
$\sigma$	vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$ ) ja
$T$	kappaleen lämpötila [K].

Useimpien rakennusmateriaalien emissiviteetti on huoneenlämmössä noin 0,8-0,95. Selkeän poikkeuksen tekee kuitenkin alumiini, jonka emissiviteetti on 0,2:n luokkaa. Säteilyn osuessa johonkin pintaan, säteily heijastuu osittain takaisin, mutta osa siitä myös absorboituu. Läpäisevissä pinnoissa, rakennusten kohdalla lähinnä lasissa, säteily voi myös läpäistä pinnan. Pinnan heijastuskykyä kuvaa heijastuskerroin  $\kappa$ , absorptiokykyä absorptiokerroin  $\alpha$  ja läpäisykykyä läpäisykerroin  $\tau$ . Tällöin jokaiselle pinnalle (materiaalille) pätee

$$0 \leq \kappa \leq 1$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

$$0 \leq \tau \leq 1$$

ja

$$\kappa + \alpha + \tau = 1. \quad (3)$$

Toisin sanoen pintaan tuleva säteily joko heijastuu, absorboituu tai läpäisee pinnan siten, että reaktion kokonaisenergia säilyy.

Konvektiossa lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voidaan jakaa pakotettuun ja luonnolliseen konvektioon. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Rakennuksissa ilman pakottaa liikkeelle esimerkiksi koneellinen ilmanvaihto tai ihmisten liikkumisesta aiheutuvat virtaukset. Luonnollisessa konvektiossa neste tai kaasu liikkuu lämpötilaerosta johtuvan paine-eron vaikutuksesta.



### 3.2 Rakennuksen energiatase

Rakennuksen tai yksittäisen huoneen dynamiikkaa voidaan kuvata tasemallin avulla. Malli perustuu siihen, että tulevien ja poistuvien energiovirtojen erotus on yhtä suuri kuin tilaan varastoituva energiovirta (Björkholtz 1987). Mallin kannalta rakennukseen tulevia energiovirtoja ovat

- lämmitysjärjestelmän luovuttama teho  $Q_{\text{lämm}}$  [W],
- rakennuksessa kehittyvä teho  $Q_{\text{kuorma}}$  [W] ja
- rakennuksen ulkopuolelta tuleva, esimerkiksi auringon säteilystä johtuva energiovirta.

Rakennuksessa kehittyvä teho voi olla ihmisten tai esimerkiksi tietokoneiden ja valaistuksen tuottamaa lämpöä, jota kutsutaan lämpökuormaksi.

Rakennuksesta poistuviin energiovirtoihin luetaan muun muassa

- rakenteiden ja pintojen läpi virtaava energia ja
- ilmanvaihdon mukana rakennuksesta poistuva energia.

Matemaattisessa muodossa rakennuksen dynamiikkaa kuvaava yhtälö voidaan esittää seuraavasti (Underwood 1999)

$$C \frac{dT_{\text{sisä}}}{dt} = Q_{\text{LÄMM}} + Q_{\text{KUORMA}} - \sum_i (A_i k_i) (T_{\text{sisä}} - T_{\text{PINTA}(i)}) - \frac{nV}{3} * (T_{\text{sisä}} - T_u), \quad (4)$$

jossa

$C$	rakennuksen sisäilman lämpökapasiteetti [ $\text{JK}^{-1}$ ],
$T_{\text{sisä}}$	rakennuksen sisäilman lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ],
$Q_{\text{lämm}}$	rakennuksen lämmitysjärjestelmän teho [W],
$Q_{\text{kuorma}}$	rakennuksen sisällä kehittyvä teho [W],
$A_i$	rakennuksen seinämän pinnan $i$ pinta-ala [ $\text{m}^2$ ],
$k_i$	pinta-alaa $A_i$ vastaavan rakenteen $k$ -arvo [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ],
$T_{\text{pinta}(i)}$	seinämän pinnan $i$ lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ],



$T_u$	ulkolämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ],
$n$	ilmanvaihtokerroin [ $\text{h}^{-1}$ ] ja
$V$	rakennuksen huoneilman tilavuus [ $\text{m}^3$ ].

Sisäilman lämpökapasiteetti  $C$  voidaan kirjoittaa myös huoneilman tilavuuden ( $V$ ), tiheyden ( $\rho$ ) ja ominaislämpökapasiteetin ( $c_p$ ) tulona. Ilmanvaihtokerroin  $n$  kuvaa kuinka monta kertaa tunnissa rakennuksen kokonaisilmamäärä vaihtuu. Pinta-aloja lukuunottamatta kaikki suureet riippuvat joko suoraan tai epäsuorasti ajasta ja vallitsevista olosuhteista kuten kosteudesta, joten tässä mielessä yhtälöä ei voida soveltaa kovin pitkän aikavälin tarkastelujaksolle.

Rakennuksen sisälämpötilan dynamiikkaa kuvaava malli voidaan esittää tarkemmin huomioimalla erikseen tulo- ja poistoilmavirrat (Pakanen 1994)

$$C \frac{dT_{\text{SISÄ}}}{dt} = Q + \sum_i k_i A_i (T_{\text{PINTA}(i)} - T_{\text{SISÄ}}) + \dot{C}_T T_{\text{ULKO}} - \dot{C}_P T_{\text{SISÄ}}, \quad (5)$$

jossa

$Q$	kokonaislämmitysteho (sis. lämpökuormat),
$\dot{C}_T$	tuloilman kapasitiivinen virta [ $\text{JK}^{-1}\text{s}^{-1}$ ] ja
$\dot{C}_P$	poistoilman kapasitiivinen virta [ $\text{JK}^{-1}\text{s}^{-1}$ ].

Kapasitiiviset virrat voidaan ilmaista tilavuusvirran ( $q_v$ ), tiheyden ( $\rho$ ) ja ominaislämpökapasiteetin ( $c_p$ ) tulona (Lepach *et al.* 1997)

$$\dot{C} = q_v \rho c_p. \quad (6)$$

Viimeisten vuosikymmenten aikana lämpökuormien lähteet ovat muuttuneet. Aikaisemmin lämpökuormista merkittävimpiä olivat ihmisten lisäksi valaistuksen hukkaenergia (hehkulampun hyötysuhde alle 5 %). Kehittyneen valaistuksen myötä valaisimet luovuttavat vähemmän energiaa ilmatilaan, mutta atk-laitteet ovat nousseet merkittäviksi lämpöenergian tuottajiksi rakennuksen sisällä. Toimistorakennuksissa atk-laitteiden tuottama energia muodostuu usein ongelmaksi ja ilmatilaa pitää jäähdyttää jopa talvisinkin suurten lämpökuormien takia.

### 3.3 Rakenteiden dynamiikka

Materiaalipinnan lämpötase saadaan kaavasta (Kaukonen 1987)

$$q_t = q_{sw} - q_r - q_c, \quad (7)$$

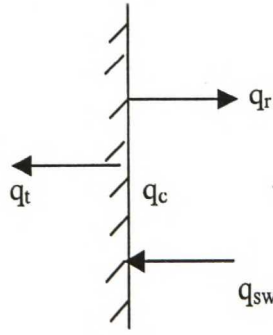
jossa

$q_t$	pinnan läpi johtuva lämpövirta,
$q_{sw}$	pintaan tuleva säteily,
$q_r$	pinnasta heijastuva säteily ja
$q_c$	pinnasta konvektiolla ilmaan siirtyvä lämpövirta.

Mikäli tuleva lämpövirta on pelkästään säteilyä, voidaan materiaalipinnan lämpötase kirjoittaa kaavan (3) perusteella muotoon

$$\tau q_{sw} = q_{sw} - \kappa q_{sw} - \alpha q_{sw}. \quad (8)$$

Kuva 1 esittää tilannetta, jossa rakenteen pintaan tuleva lämpösäteily heijastuu ja muuntuu lämpövirroiksi kaavan (7) mukaisesti.



Kuva 1: Pinnan lämpötase.

Huone- tai ulkoilmasta rakenteeseen virtaavan kokonaisenergian määrä riippuu sisälämpötilasta  $T_{\text{sisä}}$  sekä rakenteen pintalämpötilasta  $T_{\text{pinta}}$ ,  $k$ -arvosta ja pinta-alasta.  $K$ -arvo on lämmönläpäisykerroin, joka kuvaa sitä lämpövirtaa, joka kulkee yhden neliömetrin suuruisen rakenteen osan läpi  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilaeroa kohden rakenteen eri puolilla. Käytännössä  $k$ -arvo ei pysy vakiona, vaan se riippuu muun muassa rakenteen kosteudesta.  $K$ -arvo kuitenkin kuvaa rakenteen keskimääräistä kykyä vastustaa lämmön kulkua koko rakenteen käyttöajan ajan, joten tässä mielessä kyseessä on pitkäaikaista toimintaa kuvaava suure (Björkholtz 1987).  $K$ -arvo voidaan laskea lämpövastuksesta  $m$  kaavan (9) mukaisesti.

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^N m_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i} + m_u + m_s} \quad (9)$$

Lämpövastus  $m$  saadaan rakenteen paksuuden ( $d$ ) suhteesta kappaleen lämmönjohtavuuteen ( $\lambda$ ):

$$m = \frac{d}{\lambda}. \quad (10)$$

Kaavan (9) nimittäjän lämpövastusten summaus johtuu siitä, että rakenteen eri osissa ( $N$  kappaletta) myös lämpövastus vaihtelee. Lämpövastusten summaan sisältyy rakenteen ulko- ja sisäpinnan lämpövastukset ( $m_u$  ja  $m_s$ ).

Rakenteen sisäpinnan lämpötila voidaan laskea lämpövastusten avulla kaavan (11) mukaisesti

$$T_{SP} = \frac{T_{SIS\ddot{A}} * (m_0 + m_u) + T_U * m_s}{m_0 + m_s + m_u}, \quad (11)$$

jossa

$T_{sp}$  sisäpinnan lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ] ja  
 $m_0$  rakenteen lämpövastus sisäpinnasta ulkopintaan [ $\text{Km}^2\text{W}^{-1}$ ].

Yhdistettyjen konvektion ja säteilyn lämmönsiirtymiskertoimien avulla rakenteen dynamiikkaa voidaan tarkastella kaavan (12) mukaisesti (Underwood 1999)

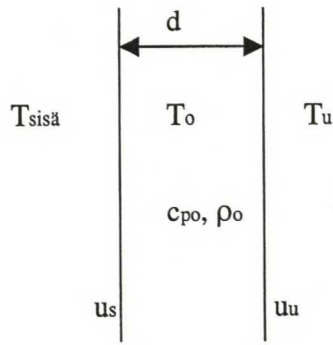
$$d\rho_o c_{PO} \frac{dT_o}{dt} = u_s (T_{SIS\ddot{A}} - T_o) - u_u (T_o - T_U), \quad (12)$$

jossa

$\rho_o$  rakennemateriaalin tiheys [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  
 $c_{po}$  rakennemateriaalin ominaislämpökapasiteetti [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  
 $T_o$  rakenteen lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $u_s$  rakenteen sisäpuolen pinnan yhdistetty konvektion ja säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [ $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$ ] ja  
 $u_u$  rakenteen ulkopuolen pinnan yhdistetty konvektion ja säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [ $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$ ].

Kaava (12) mallintaa kuvan 2 esittämän rakenteen sisäosan lämpötilaa.





Kuva 2: Rakenteen lämpötase.

Rakenteen ulkopinnan lämpötila on usein lähellä ulkolämpötilaa, mutta sisäpinnan lämpötila saattaa olla selvästi sisälämpötilaa matalampi etenkin kylmillä ilmoilla. Ulkopinnan lämpötila saattaa toisaalta olla ulkoilman lämpötilää<sup>\*</sup> muutaman asteenkin matalampi kylminä, kirkkaina öinä, koska ulkopinnan vastasäteilyn lämpötila voi tällöin olla 10 – 20 °C ulkoilman lämpötilaa kylmempää. Vastasäteilyn lämpötilan vaikutus voidaan huomioda edellä esitetyissä kaavoissa korvaamalla ulkolämpötila niin sanotulla ekvivalentilla ulkolämpötilalla, joka ottaa huomioon vastasäteilyn- ja ulkolämpötilan (Björkholtz 1987). Ekvivalentti ulkolämpötila saadaan yhtälöstä

$$T_{ekv} = T_U + \frac{\alpha^* q_s}{u_u} + \frac{u_{sät}}{u_u} (T_v - T_U), \quad (13)$$

jossa

$T_{ekv}$	ekvivalentti ulkolämpötila [°C],
$q_s$	lyhytaaltoisen säteilyn teho [Wm <sup>-2</sup> ],
$u_{sät}$	ulkopinnan säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ] ja
$T_v$	vastasäteilyn lämpötila [°C].

## 4 Rakennusautomaatiojärjestelmät

Tässä luvussa tarkastellaan rakennuksen järjestelmiä, joista tämän työn kannalta keskeisin on rakennuksen automaatiojärjestelmä. Se luo pohjan tietokoneohjatulle sisäilmaston säädölle rakennuksessa. Tietenkin rakennuksien lämmitysjärjestelmiä voidaan ohjata muutenkin, mutta erilaiset älykkäät algoritmit vaativat tietokoneohjauksen mahdollisuuden. Kenttäväyläpohjainen rakennusautomaatiojärjestelmä lisää järjestelmän älykkyyttä.

Rakennuksen järjestelmiä tarkastellaan yleisesti kohdassa 4.1 ja rakennusautomaatiojärjestelmiä kohdassa 4.2. Kenttäväyliä käsitellään kohdassa 4.3 ja rakennusautomaatiojärjestelmän käyttöliittymää kohdassa 4.4. Kohdassa 4.5 esitellään uusi ohjelmistopohjainen arkkitehtuuri rakennusten toiminnallisuuteen liittymiseksi\*

### 4.1 Rakennuksen järjestelmät

Rakennuksen toimintaa ohjaa useampi rinnakkainen järjestelmä. Rakennuksessa voi olla esimerkiksi ilmanvaihto-, kulunvalvonta-, valaistus- ja vesijärjestelmät, jotka voivat toimia itsenäisesti tai osana suurempaa kokonaisuutta. Järjestelmiä on ryhdytty viimeisten vuosikymmenten aikana integroimaan, jotta niiden hallinta helpottuisi. Toisaalta tavoitteena ovat mahdolliset (energia)säästöt. Esimerkiksi ilmanvaihto- ja vesijärjestelmien toiminnan yhdistämisestä on hyötyä, jos radiaattorien paluuvesi kierrätetään ilmanvaihtojärjestelmän kautta siten, että paluuvesi lämmittää tuloilmaa. Tällöin lämmönjakokeskuksesta rakennukseen tulevan energian käyttö tehostuu ja tuloilman lämmitystarve pienenee.

### 4.2 Rakennusautomaatiojärjestelmät

Rakennusautomaatio määritellään erilaisiksi automaattisiksi säätö-, valvonta-, ohjaus- ja hälytystoiminnoiksi, joiden avulla hallitaan kiinteistöjen LVIS-prosesseja (Forsman *et al.* 1998). Rakennusautomaatiojärjestelmän eduiksi mainitaan paremmat olosuhteet, energian säästö, rutiinityön vähentyminen sekä pienemmät taloudelliset riskit ja henkilöriskit verrattuna rakennukseen, jossa automatisoituja ratkaisuja ei käytetä.

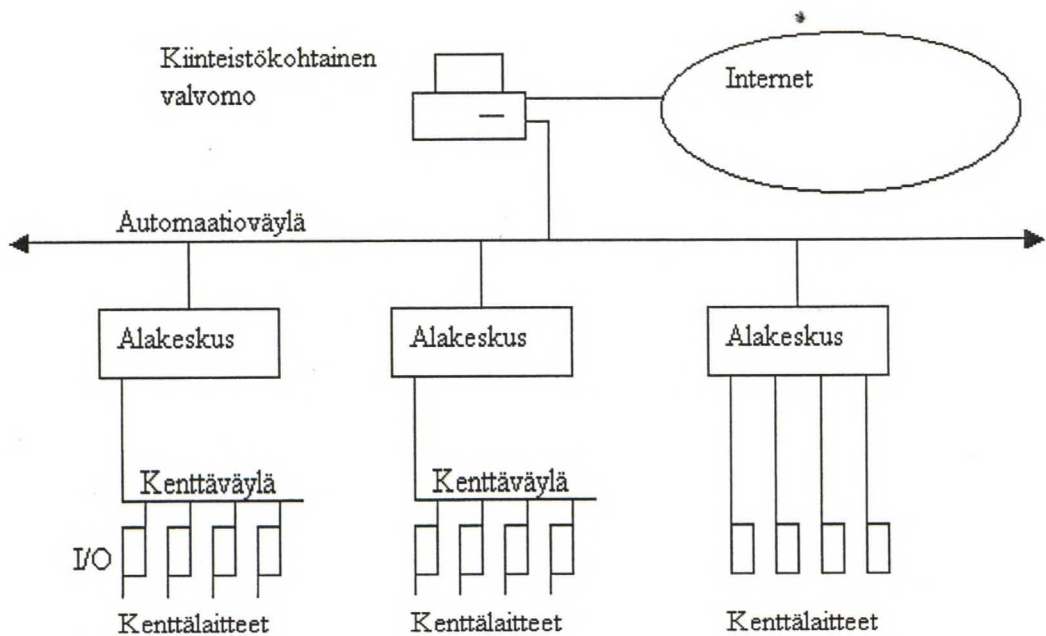
Nykyisen kaltaiset rakennusautomaatiojärjestelmät on tehnyt mahdolliseksi nopea tietokone- ja tietoliikennetekniikan kehittyminen. Digitaaliset järjestelmät saivat alkunsa 1980-luvulla, kun erillisten analogisista komponenteista koostuneiden järjestelmien tilalle ryhdyttiin rakentamaan DDC-laitteisiin perustuvia järjestelmiä. Ensimmäinen askel oli keskitetyt rakennusautomaatiojärjestelmät, joissa jokaiselle laitteelle vedettiin omat virransyöttö-, ohjaus- ja mittauskaapelinsa. Keskitetyssä järjestelmässä ”älyä” on pelkästään ylemmällä tasolla (valvomossa), jolloin kaikki mittaukset joudutaan siirtämään mittausantureilta ylöspäin ja toisaalta ohjaukset alaspäin toimilaitteille. Tässä yhteydessä älyllä tarkoitetaan prosessori- ja muistikapasiteettia.

Prossessorien tehon kasvun ja hinnan pientymisen johdosta rakennusautomaatiojärjestelmien äly kannattaa nykyisin hajauttaa myös alemmille tasoille, jopa antureille asti, jolloin puhutaankin hajautetuista järjestelmistä. Tällöin jokaisella järjestelmään liitettyllä anturilla, toimilaitteella tai muulla komponentilla on oma prosessorinsa. Sekä toimilaitteet että anturit on liitetty koko prosessin tietoliikennettä välittävään kenttäväylään. Sääto voidaan toteuttaa toimilaitetasolla, koska kenttäväylällä toisiinsa liitetyt laitteet voivat kommunikoida keskenään. Toisin sanoen mittaustieto voidaan johtaa suoraan anturilta säätimelle, ja säädin voi antaa ohjauksen toimilaitteelle ilman, että mittaukset ja ohjaukset kiertävät ylemmän tason kautta. Tällöin tiedonsiirron tarve järjestelmän eri tasojen välillä pienenee. Yleensä mittaukset halutaan johtaa joka tapauksessa valvomotasolle asti, koska siellä ylläpidetään prosessin seurantaan käytettävää tietokantaa. On myös mahdollista, että toimilaitteissa tai antureissa on muistia, jonne mittaustiedot kerätään. Tiedonsiirto antureilta valvomoon voidaan tällöin tehdä sellaisena hetkenä, jolloin tiedonsiirto ei häiritse tai hidasta väylän muuta toimintaa. Prosessoreita ei kuitenkaan yleensä asenneta jokaiseen mittalaitteeseen, vaan riittää, että alakeskukset hoitavat esimerkiksi järjestelmän toiminnan optimoinnin ja analogisten mittalaitteiden lähettämät viestit muunnetaan digitaalisiksi alakeskuksissa.



### 4.3 Kenttäväylät

Rakennuksen eri järjestelmien integrointi edellyttää järjestelmien välille yhteistä tiedonsiirtoprotokollaa eli yhteyskäytäntöä. Rakennusautomaatiojärjestelmän komponentit voidaan yhdistää automaatio- tai kenttäväylän avulla. Jos alakeskuksesta hierarkisesti alaspäin kulkeva kenttäväylä kiertää jokaisen toimilaitteen ja anturin kautta, pitää jokaisen toimilaitteen ja anturin olla digitaalinen. Analogialähdöillä varustetut anturit pitää puolestaan liittää jokainen erikseen alakeskukseen siten, että signaalille tehdään analogia-digitaalimuunnos vasta alakeskuksessa. Tyypillisesti yksi alakeskus voi muuntaa useita kymmeniä analogiasignaaleja digitaalisiksi. Alakeskuksen jälkeen signaali voidaan ohjata eteenpäin automaatioväylään (kts. kuva 3).



Kuva 3: Rakennusautomaatiojärjestelmän toiminnalliset tasot (Forsman et al. 1998).

Kuva 3 esittää rakennusautomaatiojärjestelmän toiminnallisia tasoja. Alakeskuksia voi olla useampia samassa automaatioväylässä. Väylään on lisäksi liitetty kiinteistökohtainen valvomo, jonka tehtävä on toimia rajapintana järjestelmän ja sen käyttäjän välillä, kerätä ja tallentaa mittauksia prosessista ja olla linkkinä rakennuksen ulkopuolisiin järjestelmiin kuten internetiin.



Tieto liikkuu väylässä sanomapaketteina. Pakettiin liittyy yleensä osoite, käsky tai mittaus ja jokin tarkistusbitti tai -bittejä. Sanoma voidaan lähettää protokollasta riippuen eri tavoilla väylään. Epävarmimmillaan paketti lähetetään vain kerran, meni se sitten perille tai ei. Tällaista tiedonsiirtotapaa ei kuitenkaan suosita, vaan yleisesti käytetään jonkinlaista virheentarkistustapaa. Jos tarkistusbittejä ei sisällytetä sanomapakettiin, viesti voidaan lähettää useamman kerran, jotta varmuus viestin perille pääsystä saadaan. Joissakin protokollissa vastaanottaja voidaan velvoittaa lähettämään viesti takaisin lähettäjälle kuittauksena, jolloin viestin perille meneminen varmistuu lähettäjälle. Jos kuittauksia ei tule, sanoma lähetetään uudelleen. On selvää, että jos viestin perille pääsy halutaan varmistaa, tarvitaan ylimääräistä tiedonsiirtoa väylässä. Tällä on merkitystä suurissa sovelluksissa, ei niinkään yksittäisen pienen rakennuksen tapauksessa.

Eri laitevalmistajien tuotteissa on eroja protokollan suhteen. Esimerkiksi Echelonin LonWorks-väylät liitetään verkoksi reitittimien (router) välityksellä, jolloin reititin lukee sanomasta vastaanottajan osoitteen ja välittää viestin verkossa eteenpäin vain siihen osajärjestelmään, johon vastaanottaja kuuluu. Siemensin kehittämä EIB käyttää reitittimien sijaan yhdyskäytäviä (gateway) väylien liitännässä verkoksi. Tämän takia sanomat näkyvät kaikkialla verkossa. Eri sovelluksissa on perusteltua käyttää erilaista kenttäväylä-protokollaa, eikä esimerkiksi kahta edellä mainittua voi laittaa paremmuusjärjestykseen. Jos kriteerinä on liikenteen paljous verkossa, voidaan sanoa, että LonWorks-teknologialla verkko täyttyy hitaammin reitittimien käytön ansiosta.

Yhteisillä protokollilla on pyritty siihen, että eri laitevalmistajien laitteet toimivat keskenään samoissa verkoissa. Tällä estetään muun muassa yksittäisen laitevalmistajan ylivalta tuotteiden hinnoittelun suhteen. Järjestelmistä käytetään siksi nimitystä avoin, hajautettu rakennusautomaatiojärjestelmä. Avoimudella tarkoitetaan nimenomaan sitä, että protokolla on *kaikille* avoin eli jokainen voi liittää oman sovelluksensa tai laitteensa väylään tiettyjen pelisääntöjen mukaan, jotka protokolla määrittelee.

Kenttäväyläteknologia on siinä mielessä uutta, että sitä ei ole vielä kunnollisesti standardoitu. Erilaisten järjestelmien valmistajia on lukuisia, eivätkä järjestelmät ole yleisesti yhteensopivia. Euroopassa käytetyimpiä ja kaupallisesti merkittävimpiä järjestelmiä ovat:

- BatiBUS,
- EHS
- EIB ja
- LonWorks.

BatiBUS on Merlin-Gerin-yhtiön Ranskassa kehittämä järjestelmä. EHS on puolestaan usean eurooppalaisen yrityksen yhteistyönä syntynyt järjestelmä. EIB on Siemensin ja LonWorks yhdysvaltalaisen Echelonin kehittämä. Nämä järjestelmät on myös valittu Euroopassa kehiteltävien standardien pohjaksi. Lisäksi BatiBUS, EHS ja EIB ovat ryhtyneet kehittämään yhteistä kenttäväyläteknologiaa Konnex Association nimen alla. Kyseessä on yli 200 yrityksen sponsoroima yhteistyöhanke, joka julkaistiin kesäkuussa 2000 (<http://www.eiba.com/>, <http://www.ehsa.com/>). Edellä mainittujen yhtiöiden kenttäväylät ovat aiemmin soveltuneet hieman erilaisiin prosesseihin, mutta yhteistyön myötä on tarkoitus kehittää ns. KNX-teknologia, joka on kaikissa rakennusautomaatio-sovelluksissa toimiva kenttäväylä.

Kenttäväyliä keskenäisessä vertailussa ja väylän soveltuvuuden analysoinnissa on otettava seuraavat asiat huomioon (Forsman *et al.* 1998):

## Tekniset ominaisuudet

- tiedonsiirtoprotokolla, -kapasiteetti ja käytettävissä olevat fyysiset siirtotiet

## Tuotekehitystuki

- laitteisto- ja ohjelmistotarjonta sekä kehitystyökalujen saatavuus

## Lisenssimaksut

- tuotekehityslisenssi voi sisältyä hankittavan kehitystyökalun hintaan tai sen edellytyksenä voi olla liittyminen järjestelmän taustana olevaan järjestöön (tämä saattaa olla merkittävää järjestelmän todellisen avoimuuden kannalta)

## Markkina-asema

- vahva markkina-asema ja -alue takaavat paremman tuotekehitystuen ja saatavuuden

## Tuotteiden tarjonta ja sovellusalue

- mitä laajempi on tuotteiden tarjonta, sitä suurempi on myös niiden sovellusalue, mikä luo mahdollisuudet järjestelmän laajentumiselle ja yleistymiselle

## Liitettävyyden muihin järjestelmiin

- järjestelmien integroinnista johtuen järjestelmiä tulee voida liittää yhteen
- järjestelmä saatetaan liittää esimerkiksi lähiverkkoon tai yleiseen televerkkoon

## Standardointiasema

- vaikka varsinaista standardia ei vielä ole, neljän keskeisimmän järjestelmän valitseminen standardoinnin pohjaksi antaa viitteitä tulevasta standardista
- standardoinnissa mukana oleminen antaa uskottavuutta järjestelmän tulevaisuudelle

Eri kenttäväylissä on merkittäviäkin eroja edellisten ominaisuuksien suhteen. Tämän vuoksi kenttäväylän valinta prosessiin riippuu prosessista ja sen ympäristöstä. Taulukkoon 6 on kerätty eri väylien ominaisuuksia.



*Taulukko 6: Kenttäväylien ominaisuuksia (Forsman et al. 1998).*

	<b>BatiBUS</b>	<b>EHS</b>	<b>EIB</b>	<b>LonWorks</b>
Liikennöinti-protokollan toteuttamat OSI-mallin tasot	1,2,7	1,2,3,7	1,2,3,4,7	2-7
Siirtotien varausperiaate <sup>1)</sup>	CSMA/CA	CSMA/CA tai CSMA/CD	CSMA/CD	CSMA
Fyysinen siirtotie	Parikaapeli	Parikaapeli, koaksiaalikaapeli, sähköverkko, radiotaajuus tai infrapunayhteys	Parikaapeli	Parikaapeli, koaksiaalikaapeli, valokaapeli, sähköverkko, radiotaajuus tai infrapunayhteys
Tiedonsiirtonopeus kbps	4,8	1,1-64	9,6	2,4-1250
Verkon osoiteavaruus	1000	yli 1012	11520	32385

<sup>1)</sup> CSMA/CA = Carrier Sense Multiple Access / with Collision Avoidance, CSMA/CD = Carrier Sense Multiple Access / with Collision Detection.

Kenttäväyläteknologioista BatiBUS on saavuttanut Ranskassa kansallisen esistandardin aseman vahvan markkina-aseman ansiosta. EHS:n asemaa on vaikeampi arvioida, koska sillä ei ole ollut kovinkaan montaa lopputuotetta markkinoilla, mutta silti se on avoimempi järjestelmä kuin esimerkiksi BatiBUS. EHS:n teknologian perusta on myös laajemmalla pohjalla BatiBUSiin verrattuna. EIB:llä on puolestaan Saksassa kansallisen standardin asema. LonWorks on saanut merkittävän jalansijan Suomessa, osaltaan siksi, että se on valittu avainteknologiaksi RAKLIn SaMBA-ohjelmassa (<http://www.rakli.fi>). Suomessa on useita LonWorks-tuotteita valmistavia yrityksiä ja maahantuoja.



#### 4.4 Käyttöliittymä

Käyttöliittymällä tarkoitetaan tässä sovellusohjelmaa, jota käytetään rakennusautomaatiojärjestelmän valvomossa. Käyttöliittymän kautta voidaan valvoa, ohjata ja ohjelmoida koko rakennusautomaatiojärjestelmää. Nykyisin käyttöliittymät voivat toimia tavanomaisissa PC-mikrotietokoneissa, usein Windows-käyttöjärjestelmän päällä. Rakennuksen dynamiikan hitaudesta johtuen käyttöjärjestelmältä ei vaadita tiukkaa reaaliaikaisuutta, tosin korkean prioriteetin hälytysten pitää välittyä nopeasti käyttäjälle.

Käyttöliittymä havainnollistaa sekä rakennuksen prosesseja että rakennetta. Tyypillisesti käyttöliittymäsivun pohjalle on piirretty rakennuksen kaaviokuva. Sen päälle on lisätty esimerkiksi ilmanvaihtokoneet, radiaattorit, ilmanvaihtokanavisto ja huonesäätimet. Kaikkiin toimi- ja säätölaitteisiin liittyy asetus-, olo- tai muita oleellisia arvoja, jotta eri prosessien toimintaa voidaan tarkkailla. Käyttöliittymä rakentuu useammasta sivusta. Tyypillisesti käyttöliittymän pää- tai avaussivu esittää rakennusta suuressa mittakaavassa. Siirtyminen tarkemman mittakaavan kuviin käy valitsemalla pääsivulta jokin tietty alue tai prosessi. Edelleen prosessikuvista voidaan päästä yksittäistä venttiiliä tai säädintä kuvaavalle sivulle.

Käyttöliittymät sisältävät hälytyslokin, johon järjestelmän hälytykset kirjautuvat. Hälytyksiin liittyy prioriteetti, ja korkeamman tason prioriteetin hälytykset voidaan johtaa esimerkiksi sähköpostin tai matkapuhelinverkon kautta järjestelmän valvojalle.

Käyttöliittymät voidaan tehdä valmiiden valvomo-ohjelmistojen avulla. On myös mahdollista kehittää käyttöliittymä esimerkiksi Microsoft Excel-ympäristössä, joka tarjoaa komponentteja tarvittavaan kommunikointiin rakennusautomaatioväylän ja PC:n välillä. Valmiit ohjelmistot tarjoavat mahdollisuuden kaaviokuvien tekemiseen ja mittauksen liittämiseen kaavioihin. Tällöin käyttöliittymästä tulee ilmaisuvoimaisempi ja havainnollisempi kuin pelkistä mittauksista koostuvasta näytöstä.

## 4.5 COBA

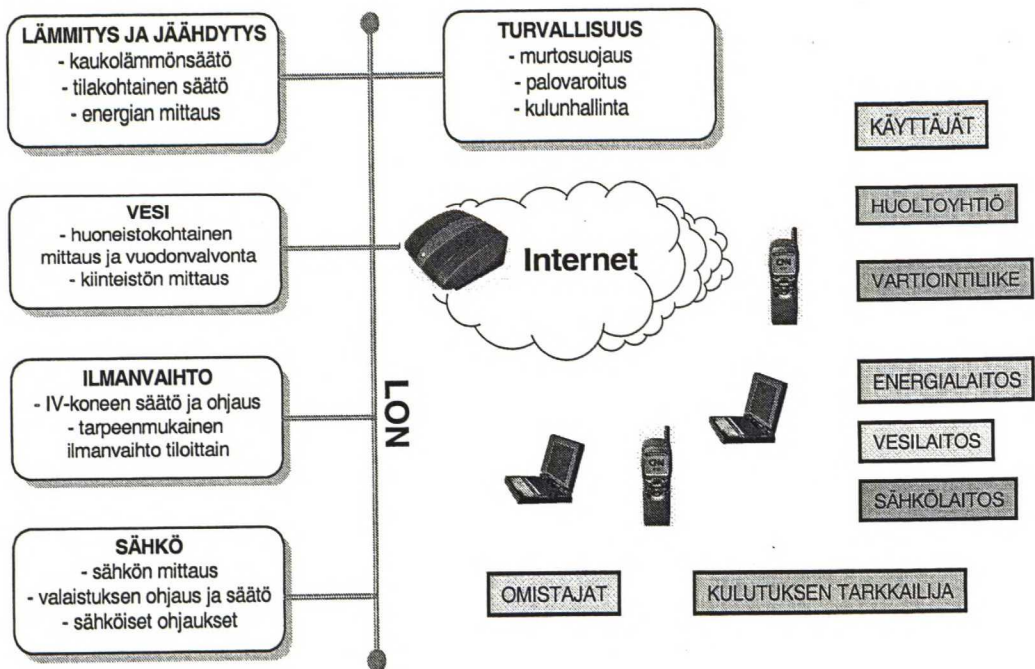
COBA on kehitteillä oleva uusi ohjelmistoarkkitehtuuri rakennusten hallintaa varten. COBAn tavoitteena on luoda avoin, standardi tapa liittyä helposti ja turvallisesti kiinteistön toiminnallisuuteen. COBA on 15 suomalaisen yrityksen yhteistyöprojekti kiinteistöjen hallinnan ja toimintojen sekä ulkoisten liitäntöjen standardoimiseksi. Projektin koordinoijana toimii Lonix Oy (Koskenranta 2001, <http://www.lonix.fi/>).

Avoimuudella pyritään laajentamaan asiakkaan mahdollisuuksia hankkia rakennusautomaatiojärjestelmänsä komponentit eri laitevalmistajilta. Avoimessa järjestelmässä laitteiden väliset rajapinnat on määritelty, joten eri valmistajien tuotteet sopivat keskenään yhteen. COBAssa avoimuutta on laajennettu järjestelmätasolta koskemaan myös palveluita. Projektissa onkin mukana yrityksiä niin rakennus-, talotekniikan kuin tietoliikennealoilta. Palvelut voivat olla internetin yli ladattavia ohjelmistokomponentteja (älykkäitä algoritmeja), joilla voidaan joko helpottaa rakennuksen hallintaa tai muulla tavalla tuoda lisäarvoa asiakkaalle.

COBA tulee olemaan toteutuessaan kuin rakennuksen käyttöjärjestelmä, joka perustuu OSGi-, Java- ja Linux-teknologioihin. Koska tavoitteena on luoda rakennuksen käyttöjärjestelmästä liitäntä internetiin, on tietoturvallisuuteen kiinnitetty suurta huomiota. Internet-liitäntä mahdollistaa rakennuksen toimintojen valvomisen ja hallinnan etäältä tavallisen selaimen avulla. Aiemmin vastaavia järjestelmiä on kyllä toteutettu, mutta ne ovat vaatineet erilliset ohjelmistot, selaimet ja yhteydet. Myös järjestelmän räätälöintiä on tarvittu sovelluskohtaisesti. COBA tulee tukemaan myös matkapuhelinpalveluita, joilla mahdollistetaan paikallis- ja etätoiminnot käyttäjäkohtaisesti matkapuhelimella. Myös sijaintitiedon hyödyntäminen liittyy oleellisesti matkapuhelinpuoleen.

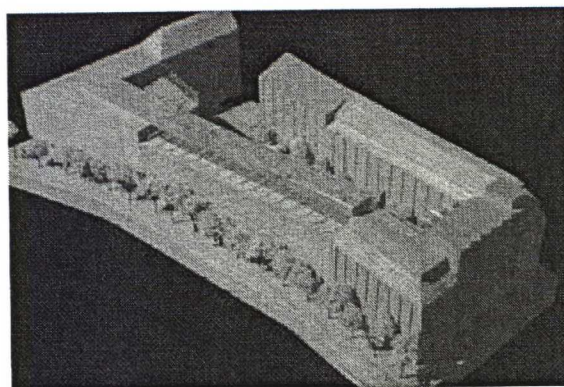
Rakennuksen puolella COBA-palvelimessa on liitäntä rakennusautomaatiojärjestelmän kenttäväylään. Aluksi COBA tukee vain LonWorks-väylää, mutta myöhemmin myös muita. Kuva 4 esittää COBA-palvelimeen liittyviä rakennuksen tietojärjestelmiä sekä niiden käyttäjiä. Kuvassa COBA-palvelin on internetin ja LonWorks-väylän välinen ”musta laatikko”.





Kuva 4: Kiinteistön tietojärjestelmät ja niiden käyttäjät (lähde [http://www.coba-group.com/index\\_fi.shtml](http://www.coba-group.com/index_fi.shtml)).

COBA valmistuu vuoden 2002 aikana, jonka jälkeen sitä sovelletaan ensimmäisenä uuteen Senaatti-kiinteistöjen pääkonttoriin ja Stakesin (Sosiaali- ja terveysalan tutkimus- ja kehittämiskeskus) toimitaloon Lintulahdenkuja 4 – 6:ssa Helsingissä. Lintulahdenkujalla saneerataan vanha varastorakennus toimistotiloiksi (Lintulahdenkuja 6) ja rakennetaan täysin uusi toimistorakennus (Lintulahdenkuja 4) saneerausosan jatkoksi. Rakennukset valmistuvat kesällä 2002. Kuva 5 esittää arkkitehdin näkemystä valmistuvasta rakennuskompleksista.



Kuva 5: Lintulahdenkuja 4 – 6 (lähde [http://www.heikkinen-komonen.fi/lintul\\_e.htm](http://www.heikkinen-komonen.fi/lintul_e.htm)).

Tässä työssä esiteltävä oppiva algoritmi soveltuu käytettäväksi COBA-ympäristössä. Algoritmin voi ladata internetin yli kiinteistön käyttöjärjestelmään. COBAa silmällä pitäen algoritmista toteutettiin RUSE-projektissa myös Java-kielinen versio. Algoritmin toiminta suunniteltiin Lintulahdenkuja 6:ssa sijaitsevan avotoimistotilan piirustusten sekä koko kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmän kuvauksen perusteella. Liittessä 1 esitetään algoritmin toimintakuvaus kyseisessä avotoimistotilassa.



## **5 Läsnaolon tunnistaminen rakennuksessa**

Ennen algoritmin kuvausta käsitellään vielä läsnäolon tunnistamiseen tai mittaamiseen liittyviä ongelmia ja niiden mahdollisia ratkaisuja. Algoritmi perustuu siihen, että rakennuksen käyttäjien läsnäolosta saadaan varma tieto. Vain tämän tiedon perusteella algoritmi voi tehdä päätelmiä lämpötilan tai ilmavirran pienentämisestä.

### **5.1 Läsnaolon mittaaminen**

Tässä työssä rakennuksen lämmitysenergian tarpeen vähentämistä lähestytään sillä edellytyksellä, että viihtyvyys rakennuksessa ei saa kärsiä. Tämän vuoksi rakennuksen lämmitysjärjestelmän toimintaan ei vaikuteta silloin, kun rakennuksen käyttäjä on läsnä. Käyttäjän poissaoloaikana lämpötilaa ja ilmavirtaa voidaan ohjata siten, että energiaa säästyy. Algoritmin oikean toiminnan kannalta läsnäolotieto rakennuksesta muodostuu erittäin kriittiseksi tekijäksi. Väärä läsnäolotieto vaikuttaa sekä järjestelmän hetkelliseen toimintaan että oppivan järjestelmän tapauksessa myöhempään käyttäytymiseen. Läsnaolon mittaus- ja arviointitapoja käsitellään kahdessa seuraavassa kappaleessa.

### **5.2 Läsnaoloanturit**

Läsnaoloanturit perustuvat liikkeen tunnistamiseen (Karjalainen 2001a). Esimerkiksi käytävätiloissa antureita on käytetty valaistuksen ohjaamiseen menestyksellisesti. Asuin- ja toimistorakennuksissa läsnäolon tunnistamisongelma on hieman erilainen, koska ei voida olettaa, että asuinrakennuksen käyttäjät ovat jatkuvasti liikkeessä. Tästä johtuen tyypillinen läsnäoloanturi voi tulkita käyttäjän poistuneen rakennuksesta, jos rakennuksen käyttäjä on paikoillaan pitkään. Toisaalta asuinrakennuksissa lemmikkieläinten liike tai tuulen heiluttama verho voivat aiheuttaa virheellisen läsnäolotiedon. Toimistopuolella esimerkiksi vartijan käynti rakennuksessa yöaikaan pitää pystyä tunnistamaan ja erottamaan rakennuksen varsinaisten käyttäjien läsnäolosta. Läsnaoloantureiden määrällä ja sijoittelulla on suuri vaikutus läsnäolotiedon luotettavuuteen. Periaatteessa jokaisen nurkan taakse pitäisi asentaa anturi, ja etenkin suurissa tai sokkeloisissa rakennuksissa antureiden asennuksesta voi aiheutua merkittäviä kuluja. Läsnaolon mittaamisen varmuutta voidaan parantaa muilla tavoin.

### 5.3 Muut läsnäolon mittaamenetelmät

Veden kulutuksen seuranta tukee läsnäoloanturilta saatavaa tietoa. Mikäli rakennuksessa on huoneistokohtainen vedenkulutusmittaus, ei tämä menetelmä tuota suuria lisäkustannuksia. Samoin sähkönkulutuksen perusteella voidaan tukea läsnäoloanturin tietoja, mutta varmoina tietoina kulutusmittauksia ei yksinään voida pitää. On mahdollista, että rakennuksessa oleskellaan, vaikka vettä tai jopa sähköä ei kulu (esimerkiksi yöllä), ja toisaalta on mahdollista, että sähköä ja vettä kuluu, vaikka rakennuksessa ei ole ketään läsnä (esimerkiksi pesukoneen käydessä).

Sisäilman laadusta voidaan myös tehdä päätelmiä rakennuksen käytöstä. Etenkin ilman hiilidioksidipitoisuus nousee nopeasti, kun rakennukseen tullaan sisään. Useissa ilmastointijärjestelmissä hiilidioksidimittaus on jo valmiiksi kytketty, joten tätäkin menetelmää voidaan soveltaa mahdollisesti pienillä kustannuksilla. Hiilidioksidipitoisuus laskee myös nopeasti, kun rakennuksesta poistutaan. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus pysyy yleensä lähellä 400 ppm:ä, joten järjestelmä voisi rekisteröidä mittauksen muutokset suhteessa ulkoilman hiilidioksidipitoisuuteen. Menetelmää voisi soveltaa suhteellisen pienissä tiloissa, joissa ihmisen tuottama hiilidioksidi aiheuttaa merkittävän muutoksen ilmanlaatuun. Isoissa tiloissa, joissa on myös paljon ilmaa, ei yhden ihmisen vaikutus välttämättä näy kovin helposti mittausten perusteella.

## 6 Oppiva algoritmi vakioilmavirtaiseen järjestelmään

Tässä luvussa kuvataan vakioilmavirtaiseen järjestelmään kehitetyn oppivan algoritmin ominaisuudet, rakenne, simuloinnit ja koekohteessa tapahtuneen testauksen tulokset. Algoritmin tehtävä on ohjata älykkäästi rakennuksen lämmitysjärjestelmää. Tavoitteena on säästää lämmitysenergiaa laskemalla sisäilman lämpötilaa silloin, kun rakennus on tyhjiillään. Jottei viihtyisyys rakennuksessa kärsisi, sisälämpötila palautetaan normaaliksi ennen käyttäjien saapumista. Vakioilmavirtaisessa järjestelmässä algoritmi tuottaa rakennuksen lämmitysjärjestelmälle sisäilman lämpötilan asetusarvon. Asetusarvon laskenta perustuu sisä- ja ulkolämpötilojen lisäksi rakennuksen käyttäjien läsnäolotietoon. Algoritmin oppivat ominaisuudet liittyvät palautuslämmitysajan arviointiin ja käyttäjää miellyttävien olosuhteiden oppimiseen (Kaartinen 2000).

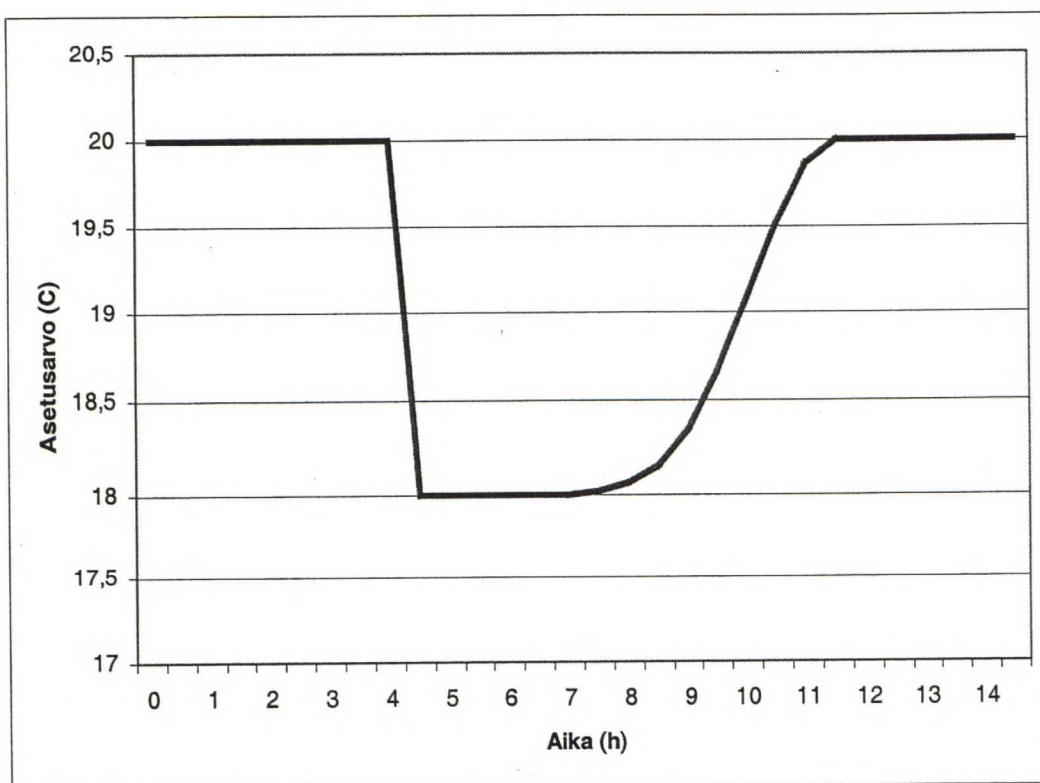
### 6.1 Algoritmin kuvaus

Lämpötilan asetusarvon laskenta-algoritmi päivittää asetusarvoa puolen tunnin välein. Asetusarvon laskemiseksi algoritmin pitää saada tieto rakennuksen sisä- ja ulkolämpötiloista, ajanhetkestä, käyttäjän lämpötilan asetuksesta sekä läsnäolon tilasta rakennuksessa. Mikäli rakennuksen käyttöaikoja ei voida ennalta määritellä, läsnäolotiedon saamiseksi tarvitaan joko luotettava läsnäoloanturi tai kytkin, jolla käyttäjä viestii järjestelmälle läsnäolostaan. Algoritmin simuloinneissa ja testauksessa läsnäolotieto on tuotettu ennalta sovittujen kellonaikojen mukaisesti.

Toimintansa ensimmäisten päivien aikana algoritmi kerää tietoa rakennuksen käytöstä ja tallentaa nämä tiedot. Koska tallennusväli on puoli tuntia, viikon aikana tallennetaan  $2 \cdot 24 \cdot 7 = 336$  arvoa. Viikko on valittu algoritmin intervalliksi siksi, että useiden rakennusten kohdalla käyttöaste noudattaa parhaiten viikkorytmiä eikä esimerkiksi kuukausi- tai vuosirytmii. Algoritmi vertailee saamiensa läsnäoloarvoja edellisen viikon vastaaviin arvoihin ja tekee näiden perusteella mahdollisia muutoksia asetusarvoon.



Lämpötilan asetusarvoa voidaan laskea, jos rakennus on tyhjillään samaan aikaan kuin edellisellä viikolla, ja edellisen viikon tietojen perusteella on todennäköistä, että kukaan ei ole tulossa rakennukseen seuraavien parin tunnin aikana. Asetusarvoa nostetaan lähestyttäessä sitä ajanhetkeä, jolloin käyttäjä on edellisellä viikolla tullut rakennukseen. Asetusarvon pudotus käyttäjän ollessa poissa tapahtuu askelmaisesti, jotta pudotuksesta saadaan mahdollisimman suuri hyöty. Asetusarvon nostaminen tapahtuu pehmenneysti vaiheittain. Kuva 6 esittää asetusarvon laskua ja nostoa. Kuvassa vaaka-akselilla on aika tunneissa ja pystyakselilla lämpötilan asetusarvo Celsius-asteissa.



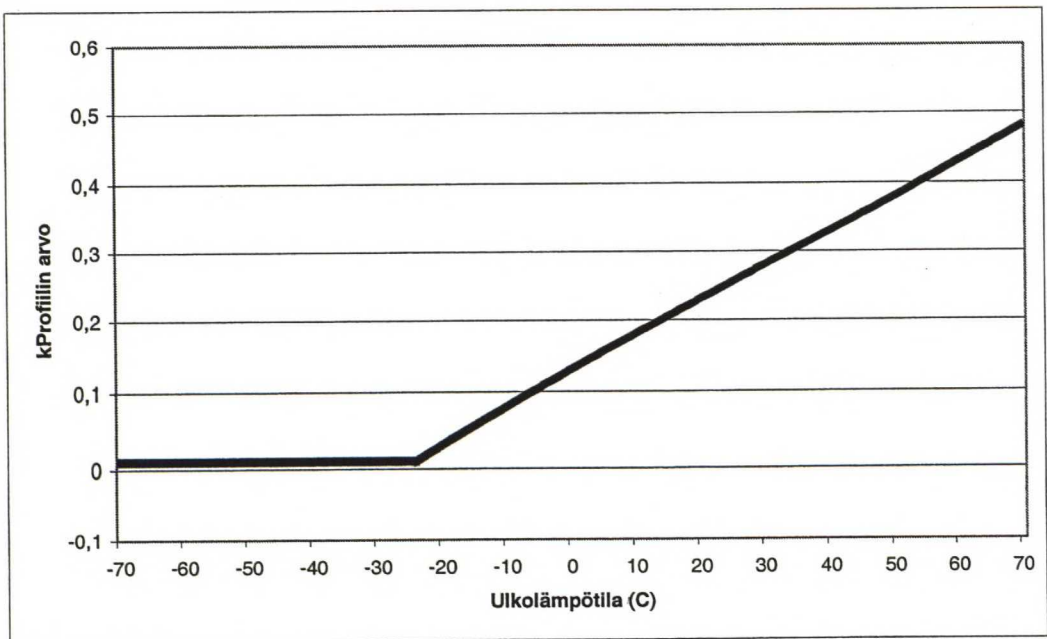
Kuva 6: Asetusarvon pudotus ja nosto ulkolämpötilan ollessa  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Kuvassa 6 on oletettu, että rakennuksen normaalilämpötila on  $20^{\circ}\text{C}$ , ja jos rakennuksessa ei ole ketään paikalla, voidaan lämpötilaa laskea  $18^{\circ}\text{C}$ :een. Käyttäjä voi määritellä nämä niin sanotut normaali- ja poissaololämpötilat.



Ulkolämpötila vaikuttaa siihen ajanhetkeen, jolloin asetusarvoa aletaan nostaa kohti normaalilämpötilaa. Ajankohta riippuu ulkolämpötilan lisäksi rakennuksen dynamiikasta ja lämmitysjärjestelmän ominaisuuksista. Näiden riippuvuuksien takia algoritmin pitää mukautua erilaisiin rakennuksiin ja vuodenaikojen vaihteluihin. Tätä varten on toteutettu toiminto, jolla lämpötilan noston aloitushetkeen vaikuttavia parametreja voidaan muuttaa. Tavoitteena on, että todellinen lämpötila on vähintäänkin hyvin lähellä asetusarvoa sillä hetkellä, jolloin rakennukseen tulee ihmisiä (kuvassa 6 ajanhetken 12 h jälkeen). Jos sisälämpötila ei ole noussut asetusarvoon tarpeeksi nopeasti, parametreja muutetaan siten, että seuraavalla kerralla asetusarvon nostaminen aloitetaan aikaisemmin.

Jokaista ulkolämpötilan kokonaislukuarvoa välillä  $-70 - +70^{\circ}\text{C}$  vastaa erillinen parametri-arvo. Näitä arvoja ylläpidetään kProfiili-nimisessä muuttujassa, joka voidaan tulkita 141 alkioita käsittäväksi vektoriksi. Muuttujan on tarkoitus kuvata rakennuksen ja lämmityslaitteen dynaamisia ominaisuuksia, jotka riippuvat muun muassa ulkolämpötilasta ja rakennusmateriaaleista. Vaikka algoritmi voi muokata kProfiilia, sen suhteen pitää tehdä jonkinlainen alkuarvaus, jotta kProfiilin mukautuminen rakennuksen dynamiikkaan olisi riittävän nopeaa. Kuva 7 esittää kProfiilin alkuarvoja, joita on käytetty sekä simuloinneissa että koekohteen testeissä.



Kuva 7: KProfiilin alkuarvot.

Asetusarvon nostovaiheessa uusi asetusarvo lasketaan kaavan

$$T_{as}(h_p + kh) = T_{pt} + \Delta T * e^{-K_p(T_u) * (M-k)^2} \quad (14)$$

mukaan, jossa

$T_{as}$	asetusarvo hetkellä $h_p + kh$ [°C],
$h_p$	ajanhetki, jolla käyttäjä on poistunut rakennuksesta [h],
$k$	aikaindeksi ( $k = 0, 1, 2, \dots, M$ ),
$h$	asetusarvon päivitysväli [h],
$T_{pt}$	poissaoloajan lämpötilan alin mahdollinen asetusarvo [°C],
$\Delta T$	normaalilämpötilan ja $T_{pt}$ :n erotus [°C],
$K_p(T_u)$	kProfiilin arvo vallitsevassa ulkolämpötilassa $T_u$ ja
$M$	lämpötilan asetusarvon päivityskertojen lukumäärä käyttäjän poissaolojakson aikana.

Edellä esitettyjen lähinnä käyttäjän poissaoloaikana opittavien asioiden lisäksi algoritmi oppii käyttäjän läsnäoloaikana lämpötilan asetusarvoon tehdyistä muutoksista. Algoritmi tallentaa käyttäjän tekemät muutokset ja ohjaa lämmitysjärjestelmää myös seuraavien viikkojen vastaavina hetkinä automaattisesti käyttäjän mielilämpötilaan. Tiettynä iltana viikossa, esimerkiksi saunaillan päätteeksi, käyttäjä saattaa haluta, että sisälämpötila on astetta korkeampi kuin normaalisti. Asetusarvon muuttaminen täytyy tehdä vain yhtenä iltana, jonka jälkeen algoritmi automaattisesti asettaa seuraavien viikkojen vastaavina hetkinä sisälämpötilan asetusarvon astetta korkeammaksi. Asetusarvoon tehty muutos on voimassa hetkellisesti 1,5 tuntia, jonka jälkeen algoritmi palauttaa asetusarvon normaalitasolle. Ainoastaan kello 22:00 jälkeen tehdyt muutokset normaalilämpötilaan nähden ovat voimassa seuraavaan aamuun kello 6:00:aan asti.

## 6.2 Simuloinnit TRNSYS-ohjelmistolla

Algoritmin toimintaa on simuloitu Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa TRNSYS-simulointiohjelmistolla. TRNSYS on Wisconsinin yliopiston kehittämä simulointityökalu, joka on tarkoitettu lämpöenergiajärjestelmien simulointiin. Kaupallisesti ohjelmisto on ollut saatavilla vuodesta 1975. TRNSYS on ohjelmoitu Fortran-ohjelmointikielellä, ja siihen voi liittää ohjelmamoduuleita, jotka kuvaavat esimerkiksi rakennuksen lämmitysjärjestelmää. Modulaarisuuden ansiosta ohjelmistolla voi simuloida hyvin erityyppisiä rakennuksia (<http://www.trnsys.com/>).

Tässä esitettävien simulointien tavoitteena on osoittaa algoritmin oppivuus ja toimivuus. Simulointikohde on tyypikerrostalon huoneisto (kolmio), jonka lämmitysmuotona on ilmalämmitys lämmöntalteenotolla. Huoneiston kokonaispinta-ala on  $90,7 \text{ m}^2$  ja ilmatilan tilavuus  $199,7 \text{ m}^3$  (Lassila 1992). Vakioilmavirtaisessa tapauksessa huoneiston tulo- ja poistoilmavirrat ovat  $47 \text{ dm}^3/\text{s}$ , joka vastaa simuloitussa kohteessa ilmanvaihtokertoimen arvoa 0,85 1/h. Tuloilman lämpötilalle sallitaan simuloinnin aikana vaihteluväli  $15 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 6.2.1 Simuloinnin kuvaus

Simulointien perusteella voidaan arvioida algoritmilla saavutettavia energiankulutuksen säästöjä ja tehdä vertailuja tilanteeseen, jossa algoritmia ei käytetä. Oleellista on, että simuloinneissa olosuhteet ovat samat vertailutapauksissa. Näin voidaan vertailla energiankulutusta tarkasti eri tapauksissa.

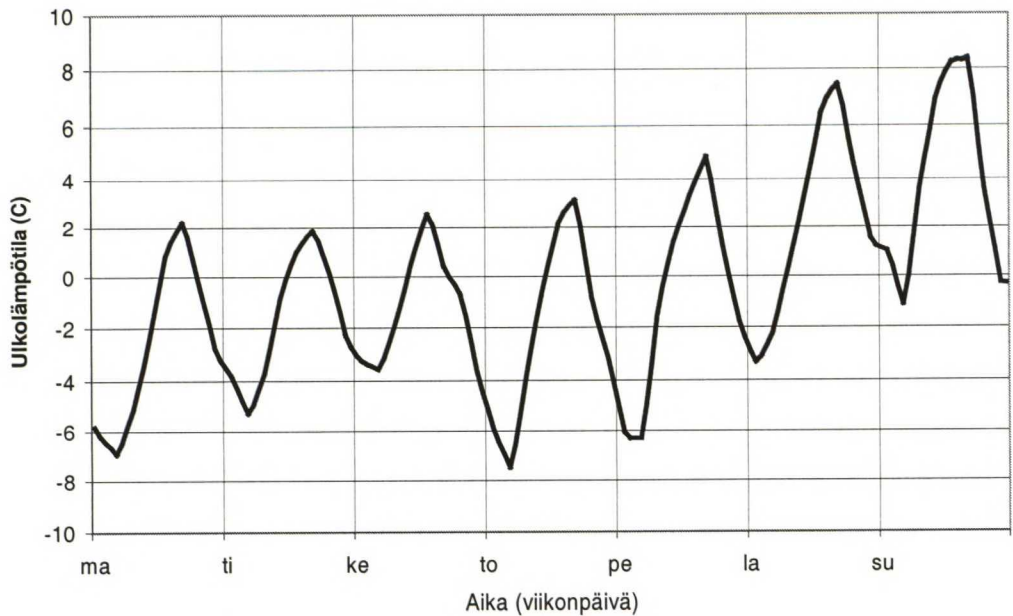
Simulointijakso on 17 viikkoa pitkä, josta energiankulutusta seurataan 15 viimeiseltä viikolta. Kahden ensimmäisen viikon aikana algoritmi oppii käyttäjän mieltymyksiä ja läsnäoloa rakennuksessa. Simuloinneissa käytettävä ulkolämpötilatiedosto on vuoden 1979 talvelta ja se on valittu siksi, että se edustaa hyvin tyypillistä talvijaksoa (Helsingissä). Ulkolämpötila on vaihdellut jaksolla  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  ja  $+10,5 \text{ }^\circ\text{C}$  välillä (keskiarvo noin  $-4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



Simuloinneissa tarkastellaan kahta tapausta. Ensimmäisessä tapauksessa sisälämpötilan asetusarvo pidetään koko jakson ajan vakiona (21 °C). Tässä niin sanotussa vertailutapauksessa algoritmi ei siis ole toiminnassa. Toisessa tapauksessa käyttäjä on opettanut algoritmille haluamansa yölämpötilan (19 °C). Toisin sanoen yöaikana (kello 22:00 – 6:00) algoritmi tuottaa lämpötilan asetusarvon 19 °C. Kuitenkin aamua lähestyttäessä algoritmi palauttaa sisälämpötilan normaalitasolle siten, että kello 6:00 sisälämpötilan pitäisi olla jälleen 21 °C. Lisäksi arkisin kello 8 – 16 välillä rakennuksen käyttäjä ei ole läsnä. Tällöin sallitaan lämpötilan asetusarvon laskeminen 18 °C:een. Ennen käyttäjän saapumista rakennukseen, algoritmin tulee palauttaa sisälämpötila normaalitasolle.

### 6.2.2 Simulointitulokset

Kuva 8 esittää ulkolämpötilan vaihteluita simulointijakson loppupuolelta, viikon 16 aikana. Ulkolämpötilan keskiarvo on kyseisen viikon aikana -0,3 °C vaihdellen -7,5 °C:n ja +8,4 °C:n välillä.

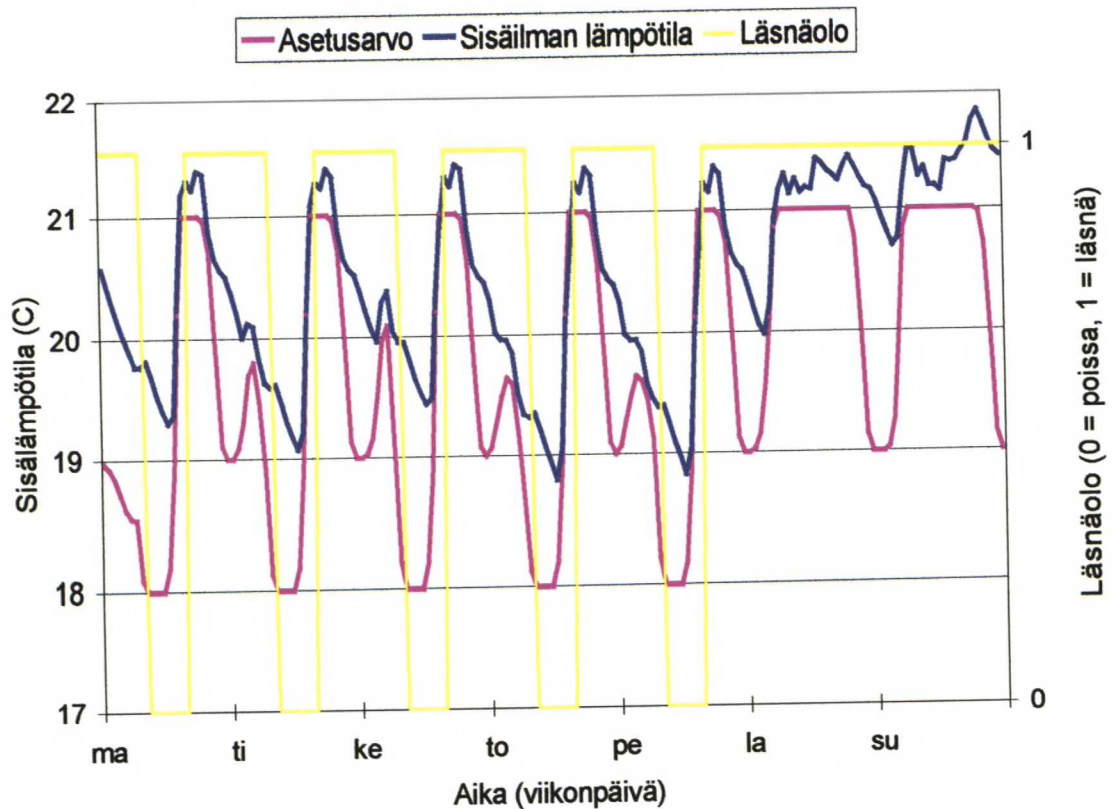


*Kuva 8: Ulkolämpötilan vaihtelut tarkasteluviikolla.*



Ensimmäisessä tapauksessa sisäilman lämpötila on pysynyt koko tarkasteluviikon ajan vakiona (21 °C). Kuvassa 9 esitetään simuloinnin tulokset toisessa tapauksessa, jossa algoritmi on ollut käytössä. Kuvaan on piirretty lämpötilan asetusarvo, sisälämpötila ja läsnäoloprofiili viikolta 16.

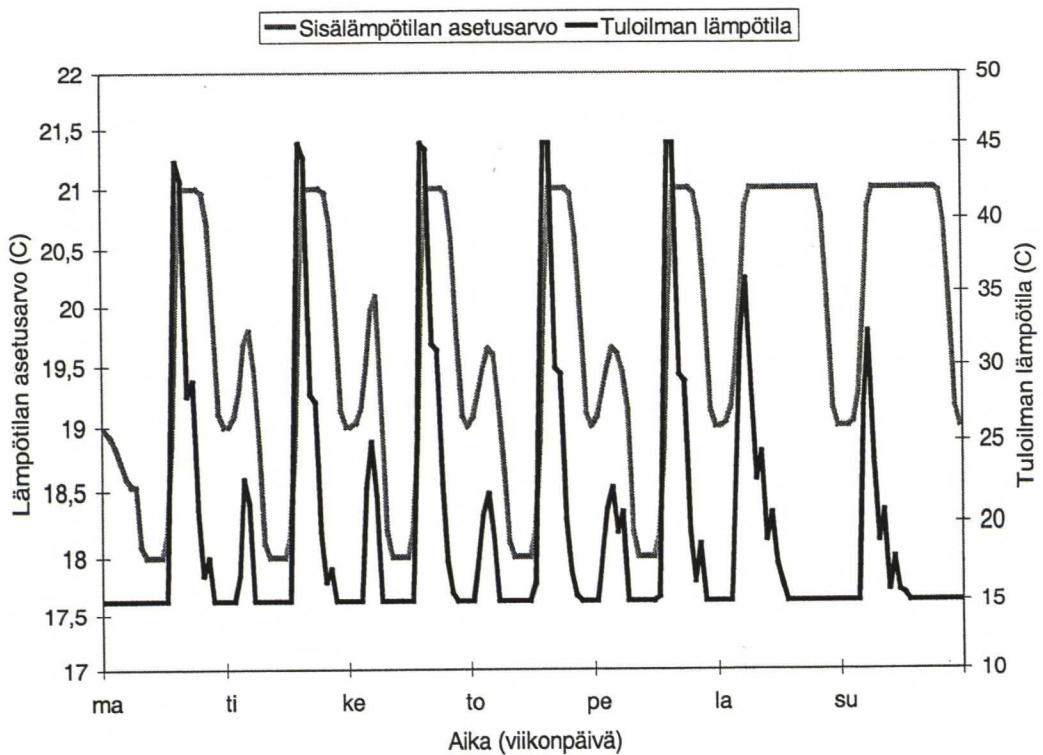
Kuvasta 9 nähdään, että algoritmi on oppinut simuloitavan rakennuksen dynamiikan, koska se osaa aloittaa normaalitasolle palautuslämmityksen juuri oikeaan aikaan siten, että rakennus on normaalilämpöinen (21 °C), kun käyttäjä saapuu rakennukseen arkisin kello 16.00. Vaikka algoritmin kProfiilin arvot eivät simuloinnin alussa ole täsmällisesti oikeita, algoritmi pystyy muuttamaan arvot simuloitavan rakennuksen dynamiikkaan sopiviksi.



Kuva 9: Sisälämpötila, asetusarvo ja läsnäoloprofiili toisessa tapauksessa viikolla 16.

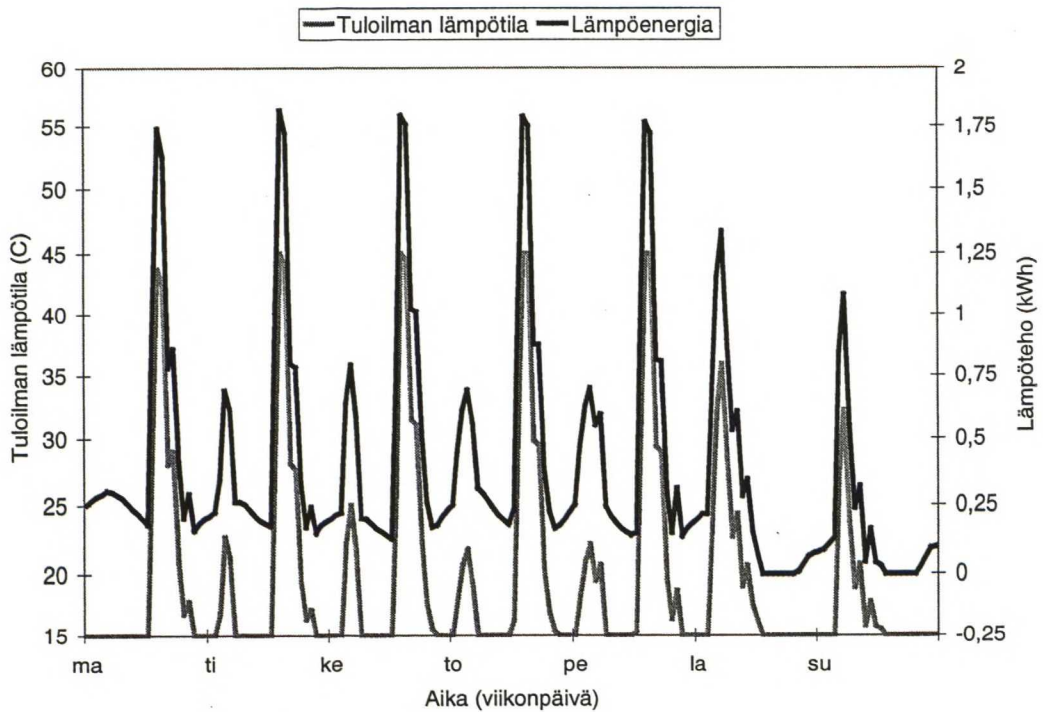
Kuvasta 9 nähdään myös, että käyttäjän asettama yölämpötila (19 °C) ei toteudu yhtenäkkään yönä, koska sisälämpötila ei laske riittävän nopeasti. Tämä johtuu osittain siitä, että sisälämpötila on joka ilta selvästi asetusarvoa korkeampi. Simuloidun lämmitysjärjestelmän lämpötilan säädin (PI-tyyppinen) ei siis ole tarkasti viritetty. Toisaalta rakennuksen sisäiset lämpökuormat muuttuvat simuloinnin aikana, mikä selittää myös lämpötilan nousemisen yli asetusarvon.

Kuva 10 esittää tuloilman lämpötilan muuttumista tarkasteluviikon aikana, kun sisälämpötilan asetusarvo muuttuu algoritmin ohjaamana. Nähdään, että tuloilman lämpötila nousee huippuarvoonsa sisälämpötilan asetusarvon noustessa normaalitasolle. Vastaavasti tuloilman lämpötila laskee minimiin, kun sisälämpötilan asetusarvoa lasketaan.



Kuva 10: Sisälämpötilan asetusarvo ja tuloilman lämpötila viikolla 16.

Kuva 11 esittää tuloilman lämmittämiseen kuluvan energian määrää tarkasteluviikolla.



Kuva 11: Tuloilman lämpötila ja lämmitysteho tarkasteluviikolla.

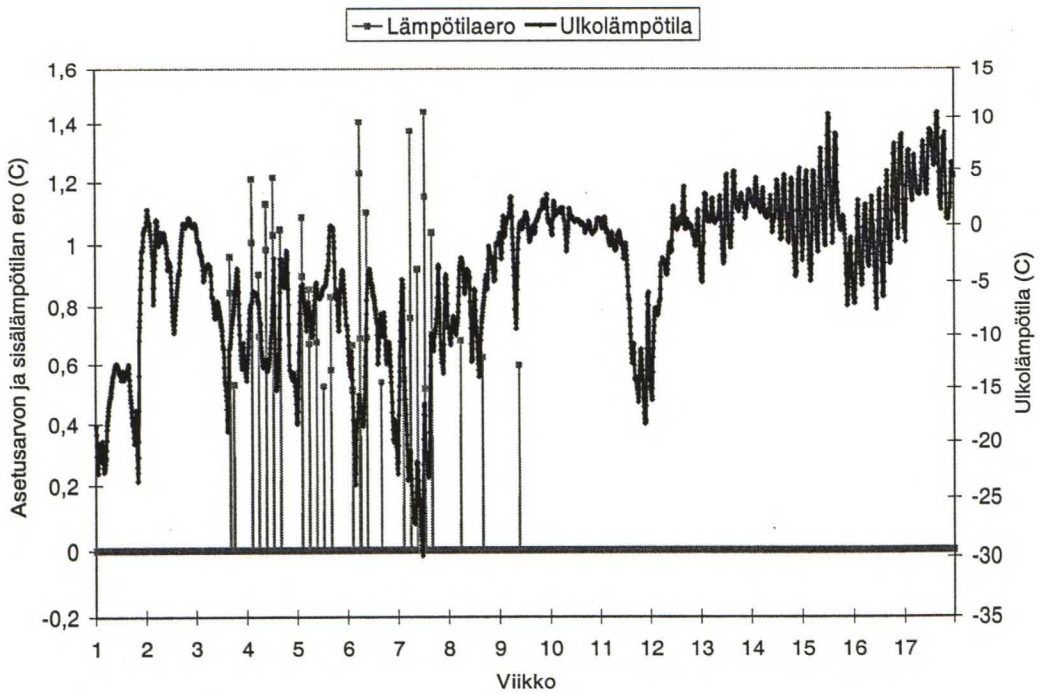
Taulukkoon 7 on koottu vertailtavien tapausten lämpöenergian kulutukset simulointijakson 15 viimeiseltä viikolta.

Taulukko 7: Energiankulutuksen vertailu simulointitapauksissa 15 viimeiseltä viikolta.

Jakso	Vakiolämpötilainen	Algoritmilla ohjattu	Ero
Energiankulutus	1911 kWh	1689 kWh	222 kWh/ 12 %

Energiankulutuslaskelmien perusteella algoritmilla voidaan saavuttaa 12 %:n säästö rakennuksen lämmitysenergiassa. Säästöt on kuitenkin suhteutettava rakennuksen viihtyisyyteen. Kuvaan 12 on piirretty lämpötilan asetusarvon ja todellisen sisälämpötilan ero niillä hetkillä, jolloin rakennuksen käyttäjä on läsnä. Arvoista on poistettu alle 0,5 °C:n erot, koska ne voivat johtua lämmitysjärjestelmän säädön epätarkkuuksista. Lisäksi negatiiviset lämpötilaerot on poistettu (sisälämpötila asetusarvoa suurempi), koska tällöin viihtyisyyden ei katsota huononevan algoritmin toiminnan takia. Kuvaan 12 on piirretty myös ulkolämpötila, joka vaikuttaa viihtyisyyteen algoritmin toimiessa.





Kuva 12: Viihtyisyyden muutos rakennuksessa simulointijaksolla.

Kuvasta 12 nähdään algoritmin toiminnan paraneminen ajan kuluessa. Ensimmäisten viikkojen aikana algoritmi opettelee käyttäjän mieltymyksiä ja läsnäolo profiilia, joten algoritmi ei tee suuria muutoksia lämpötilan asetusrvoon. Siksi asetusrvon ja sisälämpötilan eroakaan ei ole merkittävä. Viikoilla 4 – 9 viihtyvyys on ajoittain huonontunut rakennuksessa, koska algoritmi ei ole pystynyt lämmittämään rakennusta riittävän nopeasti normaalilämpöiseksi ennen käyttäjän saapumista. Etenkin kylmillä ilmoilla (alle  $-10^{\circ}\text{C}$ ) palautuslämmitys on ollut merkittävästi myöhässä (yli  $1^{\circ}\text{C}$ :n ero asetusrvon ja sisälämpötilan välillä). Heikentynyt viihtyisyys johtuu siitä, että kProfiilin alkuarvoja ei mitoitettu tarkasti simuloitavaa rakennusta varten. Toisaalta kProfiili on aluksi lineaarinen ulkolämpötilan suhteen, jotta saadaan yksinkertaiset alkuarvot. ”Todellinen” kProfiilin muoto saattaa olla esimerkiksi eksponentiaalinen.

Viikosta 10 simuloinnin loppuun asti viihtyisyys ei enää laske rakennuksen käyttäjän läsnäoloaikana. Algoritmi on oppinut rakennuksen dynamiikkaa ja osaa oppimansa perusteella ohjata sisälämpötilaa älykkäästi. Saavutetaan säästöjä lämmitysenergiassa viihtyisyydestä tinkimättä.



Koko jakson aikana rakennuksen viihtyisyys on heikentynyt 42 tunnin aikana. Prosentuaalisesti heikommasta viihtyisyydestä kärsitään siis 1,9 % läsnäoloajasta. Jos viihtyisyys määritellään siten, että rakennuksessa vallitsee 100 %-viihtyisyys, kun lämpötila on 21 °C ja 0 %-viihtyisyys, kun rakennuksen lämpötila on 19 °C (muut arvot lineaarisesti tältä väliltä), on rakennuksen keskimääräinen viihtyisyysprosentti käyttäjän läsnäoloaikana 99,2 %. Tässä arvossa on siten huomioitu myös se, kuinka paljon viihtyisyys on huonontunut. Voidaan sanoa, ettei viihtyisyys juurikaan huonone rakennuksessa algoritmin käytön aikana, vaikka lämpöenergiasta voidaan säästää 12 %.

### **6.3 Tulokset koekohteesta**

Tässä kohdassa esitetään oppivan algoritmin (vakioilmavirtainen tapaus) testaus ja testauksen tulokset METOP-matalaenergiatoimistotalossa. Testaus tapahtui vuoden 2001 keväällä (19.3. - 4.6.2001). Koekohteena käytetty VTT:n METOP-talo sijaitsee Otaniemen koealueella Espoossa. Algoritmin testauksen kannalta METOP-talo ei ole paras mahdollinen, koska hyvän eristyksen ansiosta sisälämpötila laskee hitaasti säästöjaksojen aikana. Siten myös algoritmilla saavutettavat säästöt lämpöenergiassa jäävät matalaenergiatalossa pienemmiksi kuin tavanomaisemmassa rakennuksessa. METOP-talo edustaakin lähinnä tulevaisuuden rakentamista. Säästöjä voidaan saada tulevaisuudessakin, mutta ne jäävät pienemmiksi kuin nykyrakennuksissa.

#### **6.3.1 METOP-matalaenergiatoimistotalo**

METOP-talo rakennettiin Otaniemeen vuonna 1991. Matalaenergiataloissa tilojen lämmitystehontarve on noin puolet tavanomaisen talon tehontarpeesta. Ulkoilman lämpötilan ollessa -10 °C, riittää matalaenergiatalon lämmitystehoksi noin 10 W/m<sup>2</sup> lämmitysteho. METOP-talon erikoisvalmisteisten ikkunoiden lämmönläpäisy on 60 – 70 % pienempi ja auringon säteilyn läpäisy 70 % pienempi kuin tavanomaisen kolmilasisen ikkunan. Ikkunoiden k-arvo on 0,5 W/m<sup>2</sup>K (Pietarinen ja Saari 1999).

Testaus tapahtui kaksikerroksisen METOP-talon yläkerrassa. Yläkerran pinta-ala on noin 65 m<sup>2</sup>. Huoneet ovat lähes kolme metriä korkeita. Rakennuksen ilmanvaihtolämmitysjärjestelmässä kommunikointi komponenttien välillä tapahtuu LonWorks-kenttäväylän kautta. Järjestelmän hallintaa varten väylään on liitetty mikrotietokone Microsoft Windows for Workgroups 3.11-käyttöjärjestelmällä. Testausta varten oppiva algoritmi toteutettiin Visual Basic-ohjelmointikielellä simuloinneissa käytetyn Fortran-kielisen ohjelman lisäksi.

METOP-talon toinen kerros on eristetty alakerrasta. Yläkerran ilmanvaihtolämmitysjärjestelmä on rakennettu vuonna 1998. Järjestelmän pääkomponentit ovat lämmöntalteenotolla varustettu tulo- ja poistoilmanvaihtokone, äänenvaimentimet, ilmakeinost, poistoilman päätelaitteet ja lämmitettävät tuloilmalaitteet säätiminen. Järjestelmä ulottuu kaikkiin toisen kerroksen viiteen huoneeseen sekä näitä yhdistävään käytävään (eteiseen). Järjestelmän komponentit on yhdistetty LonWorks-kenttäväylällä, jonka kautta myös säätö ja tarvittavat mittaukset tehdään.

Ilmanvaihtokone (Vallox Oy:n ILMAVA Digit S) tuottaa peruslämmön huoneisiin. Lisäksi huonekohtaiset säätimet (Produal Oy:n HLLON-tyyppiset PI-säätimet) säätävät huoneiden lämpötiloja ohjaamalla huonekohtaisia sähkölämmityselementtejä. Lämpötilan asetusarvoa voidaan muuttaa huonekohtaisesti  $\pm 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  suhteessa kenttäväylän kautta annettuun asetusarvoon (Pietarinen ja Saari 1999).

### **6.3.2 Oppivan algoritmin testaaminen**

Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän toiminnan seuranta ja ohjaus tapahtuvat kenttäväylään liitettyltä tavalliselta 486 PC-mikrotietokoneelta. Järjestelmän käyttöliittymä on toteutettu hyödyntäen Microsoft Excel-ohjelmaa ja sen tarjoamia mahdollisuuksia makrojen tekemiseen Visual Basic-ohjelmointikielellä. Kuvassa 13 on esitetty METOP-matalaenergiatoimistotalon ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän käyttöliittymän huonesäädinten perusnäyttö, joka havainnollistaa myös talon toisen kerroksen rakennetta.



**METOP-talon 2. kerroksen LonWorks huonesäädinten oloarvot**

<b>Huone 25</b>		<b>Huone 24</b>	
Lämpötila (oC)	19,81	Lämpötila (oC)	19,81
Asetusarvo (oC)	20,14	Asetusarvo (oC)	19,56
Lämmitysohjaus (%)	99,96	Lämmitysohjaus (%)	99,92
Vikahälytys	OFF	Vikahälytys	OFF

<b>Eteinen</b>		<b>Käytävä 26</b>
Lämpötila (oC)	19,29	
Asetusarvo (oC)	19,56	
Lämmitysohjaus (%)	99,92	
Vikahälytys	OFF	

<b>Huone 21</b>	<b>Huone 22</b>	<b>Huone 23</b>	
Lämpötila (oC)		Lämpötila (%)	20,32
Asetusarvo (oC)		Asetusarvo (oC)	19,56
Lämmitysohjaus (%)		Lämmitysohjaus (%)	0,88
Vikahälytys		Vikahälytys	OFF

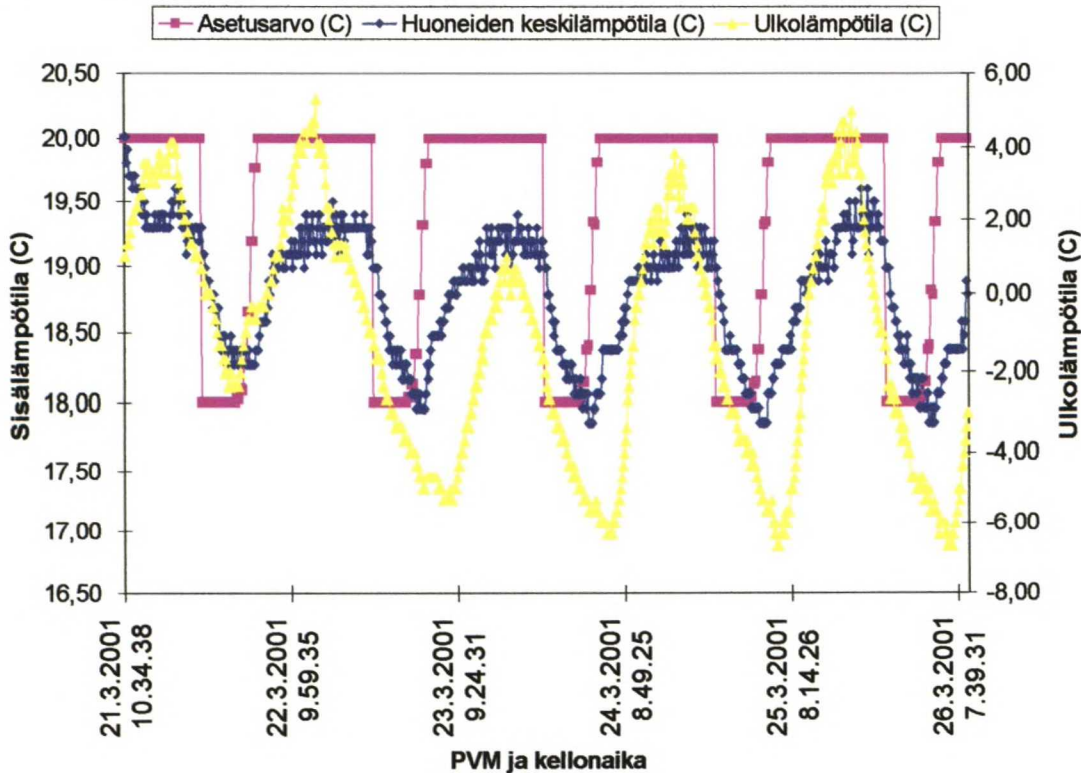
*Kuva 13: METOP-talon ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän käyttöliittymän huonesäädinten seurantasivu.*

Kuvan 13 esittämältä ruudulta voidaan lukea huoneiden lämpötilat ja erillisten sähkölämmittimen ohjausarvo (% maksimiarvosta). Huoneen 22 lämpötilansäädöstä huolehtii analoginen yksikkösäädin, josta ei ole mahdollista lukea automaattisesti mittausdataa. Siksi huonetta 22 ei voitu ottaa huomioon mittauksissa eikä säädössä.

Oppiva algoritmi toteutettiin METOP-talolla ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän käyttöliittymän yhteyteen. Käyttöliittymään liitettiin makro, joka kerää tarvittavat mittaustiedot järjestelmästä ja toimittaa nämä tiedot algoritmille, syöttää algoritmin tuottaman asetusarvon ilmanvaihtokoneelle sekä tallentaa mitatut arvot ja asetusarvon tiedostoon. Rakennuksen sisälämpötila lasketaan keskiarvona kaikkien viiden säädettävän huoneen lämpötiloista. Sisälämpötilat saadaan kuvan 13 esittämältä käyttöliittymän sivulta ja ulkolämpötilan mittausarvo näkyy käyttöliittymän pääsivulla. Arvot päivittyvät käyttöliittymässä usein suhteessa valittuun mittausarvojen tallennusväliin, joka on 10 minuuttia.

### 6.3.3 Testitulokset

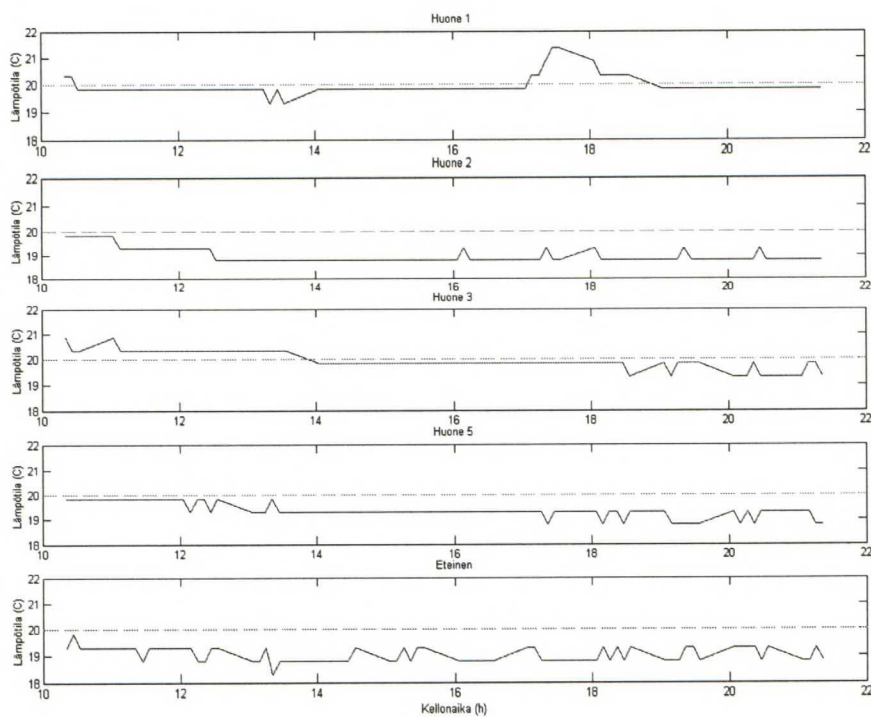
Aluksi algoritmia testattiin siten, että käyttäjän asetukseksi määrättiin kello 22:00 – 6:00 välisenä aikana 18 °C, ja muina aikoina lämpötilan asetusrarvo oli 20 °C. Tässä vaiheessa ei vielä otettu huomioon läsnäolon mittaamista, vaan algoritmillemme annettiin koko ajan läsnäolotiedoksi 1, joka vastaa rakennuksen käyttäjän läsnäoloa. Testauksessa käytettiin algoritmin ominaisuuksia käyttäjän valitseman yölämpötilan ja rakennuksen dynamiikan oppimiseksi. Ensimmäisen testausjakson (21.-26.3.2001) tuloksia esittää kuva 14.



Kuva 14: Testausjakson 21.-26.3. tulokset.

Kuvasta 14 nähdään selvästi, että sisälämpötila jää alle asetusrarvon, kun lämpötilan asetusrarvo on 20 °C. Ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän teho olisi riittänyt sisäilman lämmittämiseen, mutta järjestelmän sisäisissä asetuksissa oli virheitä. Tämä todettiin tarkastelemalla eri huoneiden lämmitysvastusten ohjausarvoja. Vastukset eivät lämmittäneet täydellä teholla, kun huoneiden keskilämpötila asettui 19,3 °C:n tuntumaan. Kuva 15 esittää mittausjakson ensimmäiseltä päivältä lämpötilojen toteutuneita huonekohtaisia arvoja, kun kaikkien huoneiden asetusrarvo on 20 °C.





*Kuva 15: Huoneissa toteutuneet lämpötilat 21.3. asetusarvolla 20 °C.*

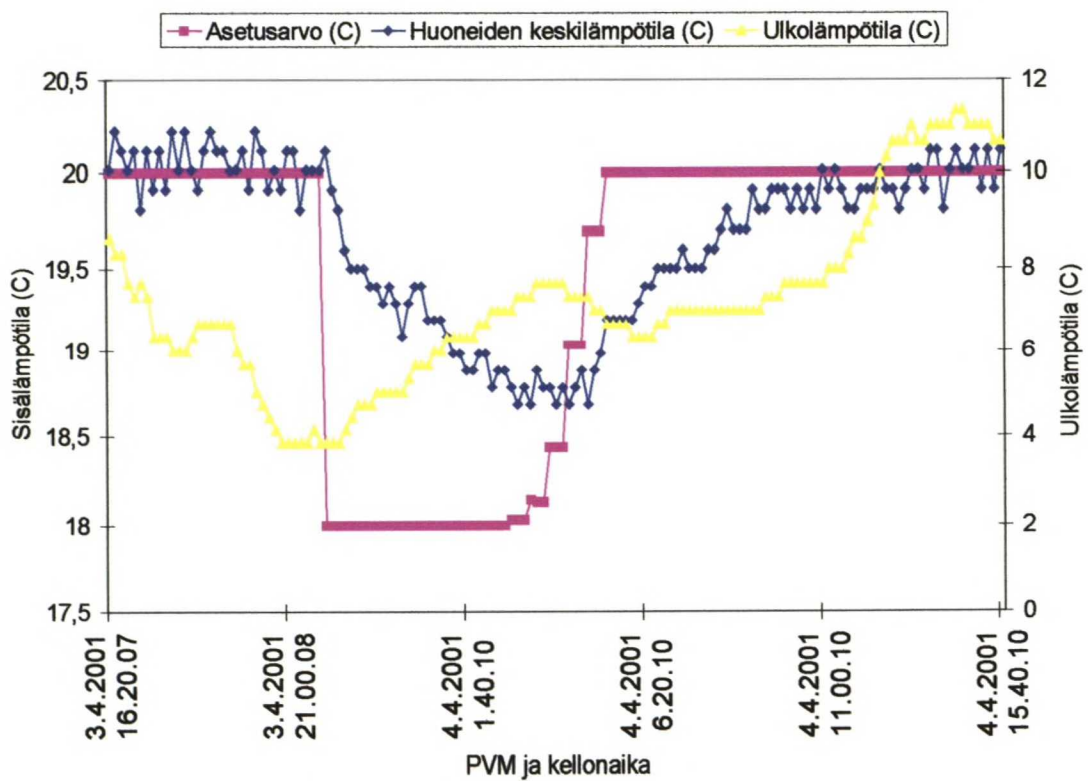
Kuvassa 15 asetusarvo on piirretty kunkin huoneen kohdalla katkoviivalla (20 °C). Vaaka-akseli on aika (kello 10:00-22:00). Huoneen 1 lämpötila on pysytellyt lähellä 20 °C lukuunottamatta noin kello 17:00-19:00 tapahtunutta nousua. Tänä aikana aurinko on paistanut huoneeseen ja lämmittänyt ilmaa. Huoneiden 2 ja 5 lämpötilat ovat asettuneet 19 °C:een ja huoneen 3 lämpötila 19,5 °C:een tuntumaan. Eteisen lämpötila on asettunut 19 °C:een. Huoneiden numeroinnit poikkeavat tässä kuvan 13 mukaisista numeroinneista. Vastaavuudet on esitetty taulukossa 8.

*Taulukko 8: Huoneiden numerointien vastaavuudet.*

Kuvan 13 mukainen numerointi	Kuvan 15 mukainen numerointi
25	1
24	2
23	3
21	5

Erilaiset numeroinnit johtuvat siitä, että ilmanvaihtokoneen ohjauksessa huoneet on numeroitu 1 – 5, mutta käyttöliittymässä 21 – 25.

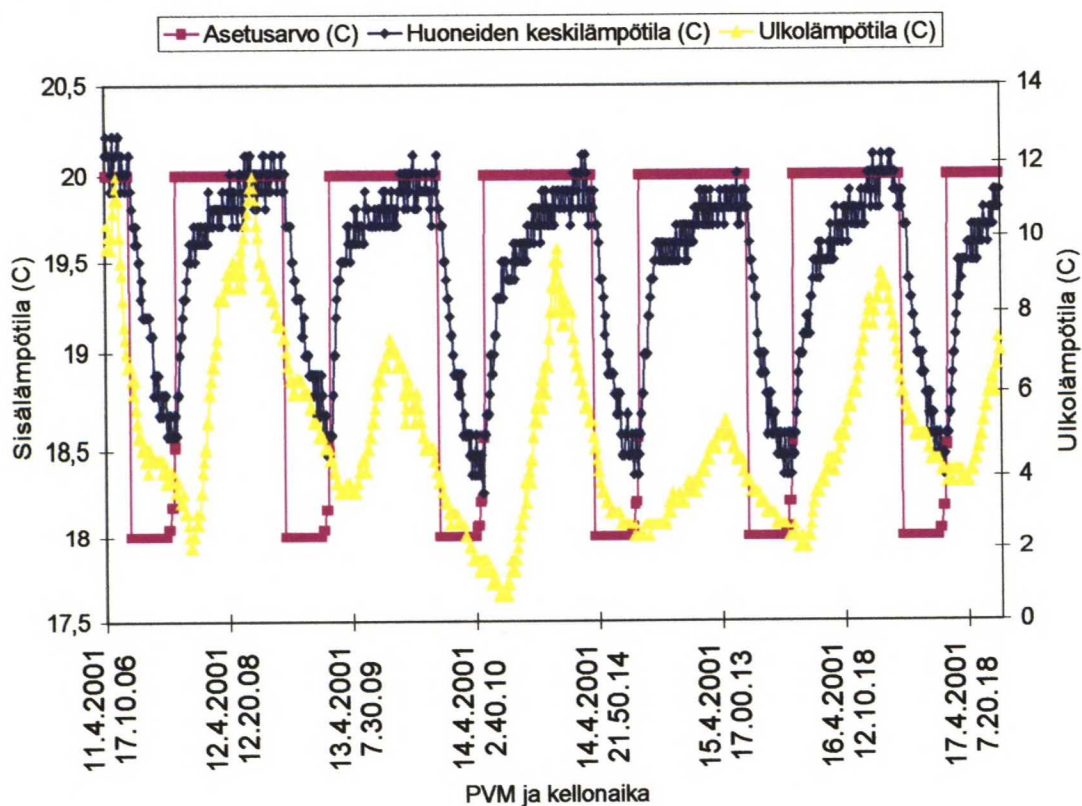
Edellisten tulosten perusteella huoneiden yksikkösäätimien asetuksia muutettiin siten, että lämpötila huoneissa nousisi lähemmäksi asetusrvoa. Tämä tehtiin muuttamalla huoneiden yksikkösäätimien arvoja suhteessa väylän kautta saatavaan lämpötilan asetusrvoon. Seuraavilla koejaksoilla myös ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilan asetusrvoa ohjattiin. Sisälämpötilan asetusrvon ollessa 18 °C, tuloilman asetusrvo laskettiin 10 °C:een. Muuten tuloilman asetusrvoa pidettiin 15 °C:ssa. Tällä pyrittiin siihen, että lämpötilan putoaminen 18 °C:een tapahtuisi nopeammin ja energiaa kuluisi vähemmän. Kuva 16 esittää näillä asetuksilla tehtyjä testiajoja.



Kuva 16: Testausjakson 3.-4.4. tulokset.

Kuvasta 16 nähdään, että rakennusautomaatiojärjestelmän asetukset ovat olleet jakson aikana kohdallaan. Sisälämpötila huoneissa nousee asetusrvoon, tosin hieman asetusrvon jäljessä. Viive on tässä tapauksessa ollut noin neljä tuntia. Huomioitavaa on myös, että sisälämpötila ei laske kuin reilun asteen verran viidessä tunnissa. Tällä mittausjaksolla ulkolämpötilan keskiarvo on 6,3 °C.

Talon lämmittämistä pyrittiin edelleen minimoimaan, jos sisälämpötila olisi asetusarvoa suurempi. Talon lämmitystä pyrittiin tehostamaan silloin, kun asetusarvo kasvaa. Näitä toimenpiteitä varten tehtiin makrot ilmanvaihtokoneen puhallinnopeuden ja jälkilämmityksen ohjaamiseksi. Lämpötilaa nostettaessa puhallinnopeus säädettiin täydelle teholle, muuten puhallinta käytettiin 62,5 %:n teholla. Myös jälkilämmitys kytkettiin päälle lämpötilaa nostettaessa. Näin sisäilman lämmittäminen oli mahdollisimman tehokasta lämpötilan nostovaiheessa. Jälkilämmitys kytkettiin pois päältä, jos asetusarvo oli alle sisälämpötilan. Tällä pyrittiin siihen, että sisälämpötila seuraisi asetusarvoa paremmin. Kuvasta 17 nähdään näillä asetuksilla suoritettujen testausjakson tulokset.



Kuva 17: Testausjakson 11.-17.4. tulokset.

Tämän testausjakson ulkolämpötilan keskiarvo on hieman alle +5 °C. Etenkin kylminä päivinä sisälämpötilan nouseminen takaisin 20 °C:een kestää pitkään. Kuitenkin kohtuullisen lähelle 20 °C:ta päästään melko nopeasti, joten suurta joustoa viihtyisyyden suhteen ei tehdä.

Näillä lämmitysjärjestelmän asetuksilla aloitettiin oppivan algoritmin muuttuvien parametrien mukauttaminen talon dynaamisiin ominaisuuksiin. Otettiin käyttöön algoritmin läsnäolotietoon perustuva asetusarvon laskenta ja talon dynamiikasta oppiva kProfiilin muokkaaminen. Käyttäjän läsnäoloprofiili muotoiltiin taulukon 9 mukaiseksi.

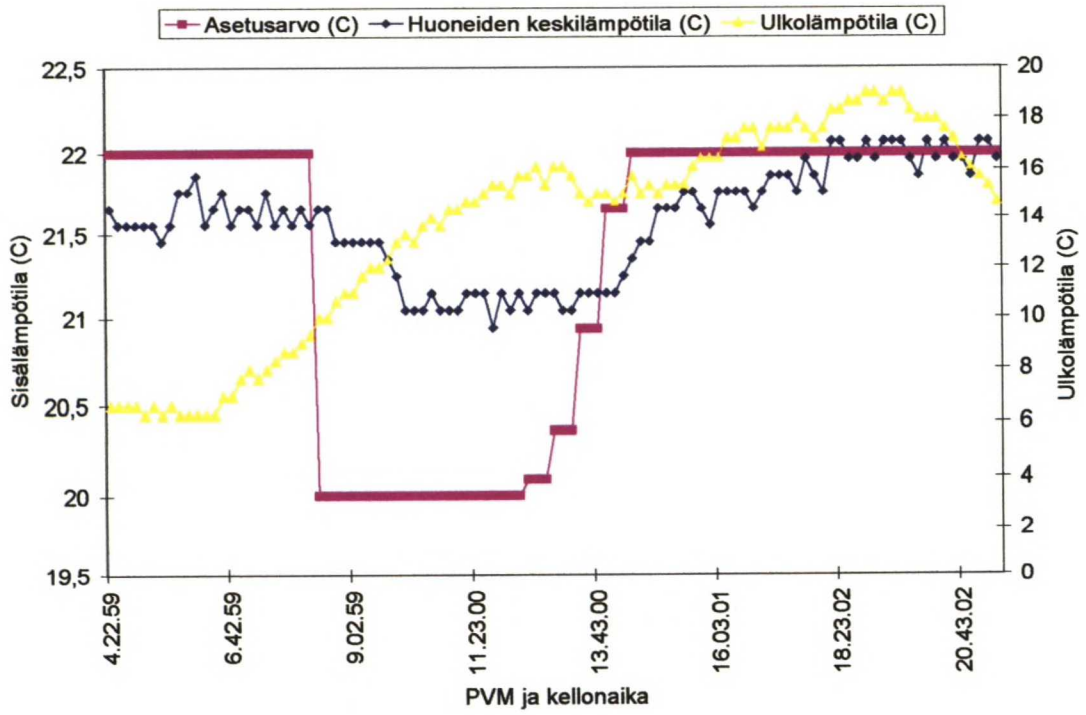
*Taulukko 9: Simuloidut käyttäjän poissaoloajat.*

	Poissa klo:
<b>MA</b>	8:00-16:00
<b>TI</b>	8:00-16:00
<b>KE</b>	8:00-16:00
<b>TO</b>	8:00-16:00
<b>PE</b>	8:00-16:00
<b>LA</b>	9:00-15:00
<b>SU</b>	13:00-17:00

Taulukon 9 arvojen perusteella algoritmillemme syötettiin läsnäolotiedoksi joko 1 (läsnä) tai 0 (poissa). Lisäksi määrättiin, että käyttäjä antaa tiistaista torstaihin yöasetuksen, jolloin asetusarvo muuttuu yöksi kahta astetta normaalilämpötilaa pienemmäksi. Koska ulkolämpötila oli jo suhteellisen korkea, normaalilämpötila rakennuksessa nostettiin 22 °C:een ja poissaololämpötilaksi asetettiin 20 °C.

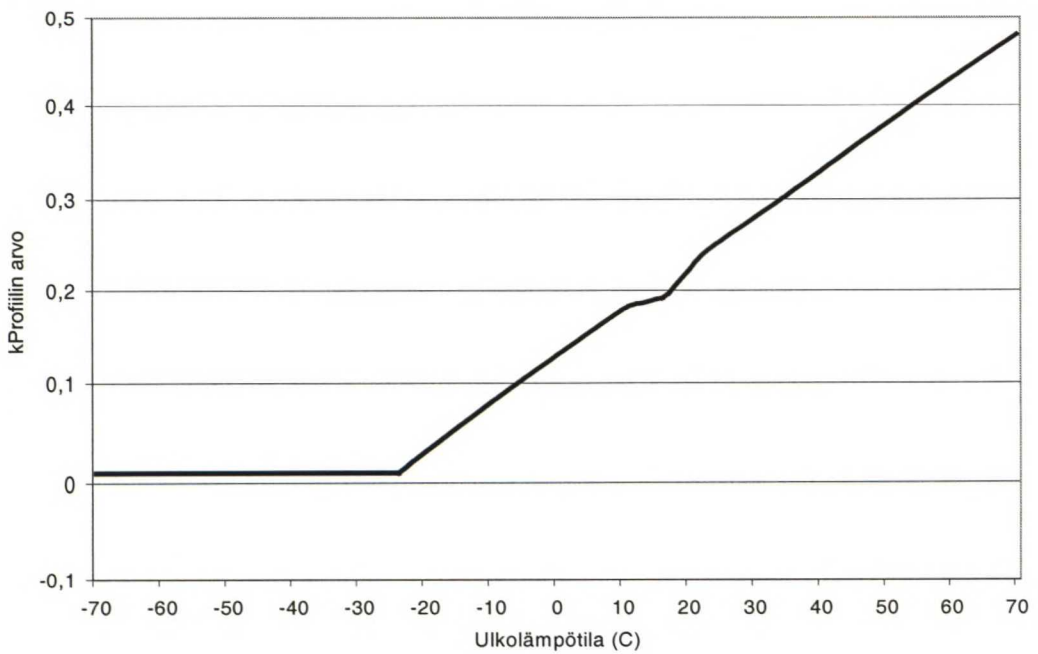
Kuva 18 esittää maanantain 7.5.2001 tuloksia kello 4:20 – 21:20. Asetusarvo on laskettu sen perusteella, että käyttäjä on poissa kello 8:00-16:00 ja myös edellisillä viikoilla käyttäjä on ollut samaan aikaan poissa. Kello 16:00 mennessä sisälämpötila on noussut 21,8 °C:een, joten viihtyisyys rakennuksessa on normaalilla tasolla käyttäjän saapuessa. Ulkolämpötilan keskiarvo mittausjakson aikana on +13,8 °C. Päivällä sisälämpötila ei ole laskenut yhtä astetta enempää korkean ulkolämpötilan vuoksi.





Kuva 18: Testauksen tulokset 7.5.

4. - 8.5. suoritetun testausjakson aikana algoritmin kProfiili muuttui. Oletettavaa oli, että kProfiilin arvot pienenisivät, mikä vastaa asetusarvon noston aloittamisajankohdan aikaistamista. Kuvassa 19 on esitetty kProfiili testausjakson jälkeen.



Kuva 19: KProfiili testausjakson 4.-8.5. jälkeen.

Nähdään, että kProfiili on muuttunut odotettuun suuntaan (vertaa kuva 7, jossa kProfiilin alkuarvot). Muutokset ovat tapahtuneet ulkolämpötila-aluetta 10 – 25 °C vastaavalla alueella. Ulkolämpötila on vaihdellut testauksen aikana +6,3 °C:n ja +20 °C:een välillä. KProfiili muuttuu pehmeästi, joten vaikka varsinainen muutos tehtäisiin ulkolämpötilaa +15 °C vastaavassa kohdassa, muutoksen vaikutukset ulottuvat myös 15 °C:een ympäristöön kuten kuvasta 19 nähdään.

### 6.3.4 Johtopäätökset

Tässä luvussa on esitetty kehitetyn oppivan algoritmin testaus ja testauksen tulokset. Teknisten alkuvaikeuksien jälkeen algoritmia ehdittiin testata METOP-talossa vain melko lyhyen aikaa. Ulkolämpötila oli liian korkea testauksen loppuvaiheessa, mutta suuntaa antavia tuloksia saatiin. Kesällä sisälämpötila ei laske päivisin tarpeeksi käyttäjän poissaoloaikana eikä lämmityksen tarve ole muutenkaan suuri, joten algoritmin ominaisuudet eivät tule lämpimillä ilmoilla kovin hyvin esiin.

Verrattaessa testauksen tuloksia TRNSYS-simulointeihin (kohta 6.2) nähdään, että säästö lämmitysenergiassa ei ole yhtä suuri METOP-talossa kuin simuloinneissa. Tämä voidaan päätellä siitä, että sisälämpötila ei laske säästöjaksojen aikana yhtä paljon METOP-talossa kuin TRNSYS:llä simuloidussa rakennuksessa. Simuloitu rakennus ja METOP-talo eivät olekaan vertailukelpoisia keskenään, koska ne ovat täysin erilaisia rakennuksia (esimerkiksi erilaiset rakenteiden k-arvot). Lisäksi on huomioitava se, että TRNSYS:llä simuloitiin rakennusta talvikautena, kun METOP-testaus sijoittui ajallisesti kevään loppuun.

METOP-talo ei ole testauksen kannalta paras mahdollinen rakennus. Energian säästö on maksimoitu talossa muutenkin, ja tiiviit rakenteet, tehokas lämmöntalteenotto sekä muut lämmön säästöön ja kierrättämiseen liittyvät ratkaisut on toteutettu niin tehokkaasti, että lämpötila ei laske kovin nopeasti asetusarvon laskeessa. Algoritmi toimii paremmin, jos lämpötila ehtii laskea käyttäjän ollessa poissa asetusarvon määrämälle poissaolotasolle. Testauksessa sisälämpötila jäi tyypillisesti astetta liian korkeaksi säästöjaksoilla.

KProfiilin alkuarvot eivät olleet aivan kohdallaan testauksen alussa. Pidempi testausjakso kylmillä ilmoilla olisi muuttanut kProfiilia enemmän taloon sopivaksi. Osittain kProfiilin liian suurista arvoista johtui pitkä viive lämpötilan nostovaiheessa. Sisälämpötila ei noussut tarpeeksi nopeasti asetusarvoon, kun asetusarvoa nostettiin.

Tulokset antoivat viitteitä siitä, että algoritmi mukautuu ajan myötä taloon sopivaksi kuten pitääkin. Mukautuminen vie kuitenkin aikaa, periaatteessa kaikki ulkolämpötilat pitäisi käydä läpi ennen kuin kProfiili olisi muotoutunut taloon sopivaksi. Mukautuminen onkin jatkuva prosessi ja tapahtuu algoritmin jo toimiessa.

Algoritmin toiminnan vaikutusta energiankulutukseen ei vakioilmavirtaisessa tapauksessa arvioitu. TRNSYS-simulointien perusteella algoritmilla olisi kuitenkin mahdollisuus saavuttaa noin 10 %:n säästö lämmitysenergiassa ilman, että viihtyvyys heikkenee huomattavasti. METOP-talossa tästä arvosta jäädään ilmeisesti hieman.

Testauksen perusteella voidaan päätellä, että algoritmin toiminnan kannalta on tärkeää, että lämmitysjärjestelmän sisäiset asetukset ovat kunnossa. Koska yksikkösäätimien asetukset eivät olleet kohdallaan METOP-talossa, huoneiden lämpötilojen keskiarvo asettui alle asetusarvon. Algoritmin oppiminen ei ole mahdollista, jos asetusarvoa ei koskaan saavuteta. Toisaalta oppimisesta ei ole myöskään hyötyä, jos järjestelmä ei toimi oikein.

Tulosten perusteella pääteltiin, että algoritmiin kannattaa sisällyttää ilmanvaihtokoneen puhallinnopeutta ohjaava toiminto, jolloin lämmitystä voidaan erityisesti tehostaa palautuslämmityksen aikana. Suurella puhallinnopeudella saadaan suurin mahdollinen lämmitysteho, jonka hyödyntäminen on energiataloudellisesti ajateltuna järkevää lämpötilaa nostettaessa. Lisäksi puhallinnopeutta voidaan säästöjaksolla pienentää, koska rakennuksessa ei ole suurta ilmanvaihtotarvetta. Suurella puhallinnopeudella on lämmitysvaiheessa sekin etu, että rakennus tuulettuu tehokkaasti lämmitettäessä, jolloin ilma on raikasta käyttäjän saapuessa rakennukseen. Nämä ominaisuudet toteutettiin algoritmin toiseen versioon, jonka toiminta, rakenne, ominaisuudet, simuloinnit ja testaus METOP-talossa kuvataan luvussa 7.



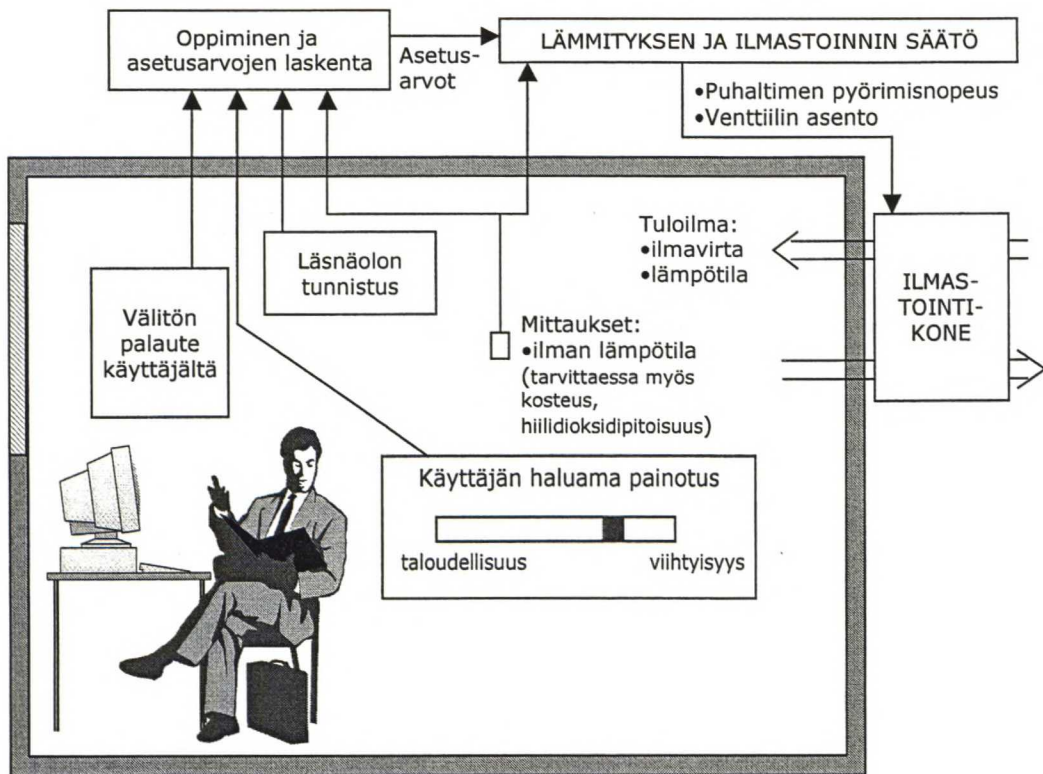
## 7 Oppiva algoritmi muuttuvailmavirtaiseen järjestelmään

Oppivaa algoritmia kehitettiin edellä esitettyjen simulointien ja koekohteen testauksen tulosten perusteella. Tässä luvussa kuvataan oppivan algoritmin toisen version ominaisuudet ja rakenne. Keskeisimmät parannukset vanhaan nähden ovat:

- algoritmi muuttaa sekä lämpötilan että ilmanvaihtokoneen ilmavirran asetusarvoja,
- palautuslämmityksen aikana asetusarvoille ei tehdä pehmennyksiä vaan muutos on aina askelmainen,
- palautuslämmitysjakson lopussa ilmanvaihtoa tehostetaan suurimman mahdollisen lämmitystehon takaamiseksi ja sisäilman laadun parantamiseksi,
- kProfiilin korvaa palautuslämmityksen ennakkokäyrä, jolta nähdään suoraan arvioitu palautuslämmitykseen kuluva aika,
- ennakkokäyrään tehtävän muutoksen suuruus oppimishetkillä riippuu oppimistarpeen suuruudesta (vakioilmavirtatapauksessa kProfiiliin tehtävä muutos on vakio) ja
- taloudellisuus-viihtyisyys-tason valinta sisältyy algoritmiin.

Kuva 20 esittää oppivan algoritmin liittynän rakennuksen muihin järjestelmiin ja laitteisiin.





Kuva 20: Periaatteellinen kuva oppivan algoritmin liittymisestä eri laitteisiin ja järjestelmiin (kuva: Sami Karjalainen, VTT).

## 7.1 Algoritmin kuvaus

Uuden algoritmin suunnittelussa on huomioitu edellisen algoritmin heikkoudet ja ominaisuuksia on parannettu. Uuden algoritmin toiminta perustuu siihen, että palautuslämmityksen aloittamisen ajankohdan oletetaan riippuvan seuraavista tekijöistä:

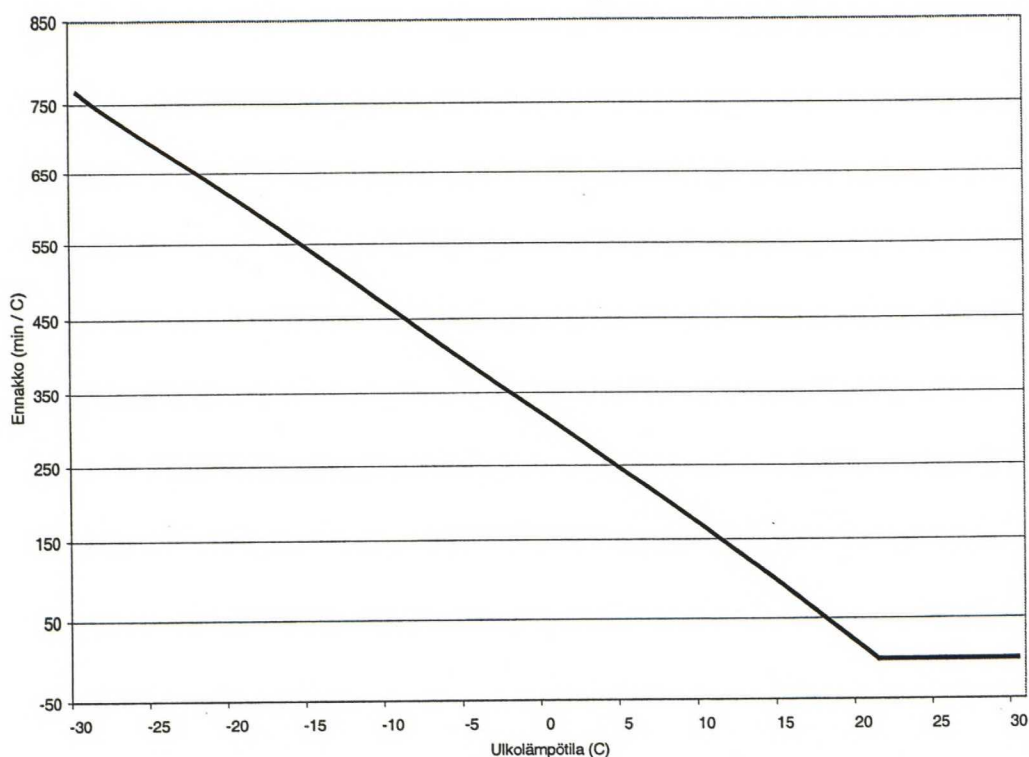
- ulkoilman lämpötila  $T_u$ 
  - kylmällä ilmalla lämmitys aloitetaan aikaisemmin kuin lämpimämmällä
- sisä- ja normaalilämpötilan ero  $\Delta T$ 
  - jos sisälämpötila on laskenut paljon, lämmitys aloitetaan aikaisemmin
- aika  $(M - k) \cdot h$ 
  - kuinka kauan oletetaan olevan aikaa rakennuksen käyttäjän saapumiseen.

### 7.1.1 Palautuslämmityksen ennakkokäyrä

Uuden algoritmin toiminta perustuu läsnäolon tarkkailun suhteen algoritmin edelliseen versioon. Muutokset koskevat pääasiassa sitä osaa, joka huolehtii rakennuksen dynamiikan oppimisesta. Säästötilassa, jolloin rakennuksen käyttäjä ei ole läsnä, lämpötila saattaa laskea huomattavasti, joten niin sanottuun palautuslämmitykseen kuluva aika voi olla suhteellisen pitkä.

Rakennuksen sisälämpötilan nostamiseen yhdellä asteella kuluva aika arvioidaan vallitsevan ulkolämpötilan perusteella. Algoritmi alustaa palautuslämmitysaikaa kuvaavan ennakkokäyrän olettaen aluksi lineaarisen riippuvuuden ulkolämpötilan ja palautuslämmitysjajan välille, jotta saadaan yksinkertaiset alkuarvot. Oppimisen tavoitteena on, että algoritmi muuttaa näitä arvoja, ja että arvojen muutoksilla on suora vaikutus palautuslämmitysaikaan. Oppimisen myötä lineaarinen riippuvuus muuttuu joko paloittain lineaariseksi tai käyrän sovituksella epälineaariseksi siten, että opitut tulokset vaikuttavat mahdollisimman paljon. Oppiminen kuvataan kohdassa 7.1.4.

Kuva 21 esittää edellä mainittua ennakko-ulkolämpötilariippuvuutta alkutilanteessa. Normaalilämpötilaksi rakennuksessa on oletettu  $21\text{ °C}$ , joten tätä suurempia ulkolämpötila-arvoja vastaa lämmitysennakko  $0\text{ min/°C}$ . Normaalilämpötilalla tarkoitetaan siis sitä lämpötilaa, jonka tulisi vallita käyttäjän ollessa läsnä rakennuksessa. Mikäli normaalilämpötila muuttuu, ennakkokäyrä siirtyy vaakasuunnassa oikeaan kohtaan (esimerkiksi alkamaan  $22\text{ °C}$ :sta).



Kuva 21: Palautuslämmityksen ennakkokäyrän alkuarvot.

Kuvan 21 ennakkokäyrä esittää ulkolämpötilan funktiona palautuslämmitykseen kuluvan ajan normaalilämpötilan ja sisälämpötilan eron yhtä astetta kohti. Ennakkokäyrän ulkolämpötila-akselia on pienennetty verrattuna vanhan algoritmin kProfiiliin, koska tavoitteena on ollut myös pienentää algoritmin muisti- ja tehovaatimuksia. Ennakkokäyrän arvot on laskettu suoran yhtälön  $y = kx + b$  mukaan, jossa  $k = -15$  ja  $b = 315$ .

Suoran parametrit  $k$  ja  $b$  on laskettu METOP-talossa 19.3. - 15.5.2001 tehtyjen kokeiden perusteella. Testausjaksolta valittiin muutama palautuslämmitys, joiden aikana ulkolämpötila on pysynyt kohtuullisella tarkkuudella samana. Palautuslämmitysten alussa sisä- ja normaalilämpötilojen ero on ollut tyypillisesti yksi aste. Palautuslämmityksen kesto arvioitiin testiajojen tuloksista muutamilla ulkolämpötilan arvoilla, joista laskettiin suoran muut pisteet. Suora on sovitettu vastaamaan parhaiten ulkolämpötila-aluetta  $10 - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vaikka arvot ovat hyvin likimääräisiä, ne kelpaavat mainiosti alkuarvoiksi, koska algoritmi voi muuttaa arvoja nopeasti tarpeen mukaan.



Jos algoritmin mukautumista tiettyyn rakennukseen halutaan nopeuttaa, voidaan ennakkokäyrän muoto ennustaa etukäteen esimerkiksi askelkokeiden perusteella. Sisälämpötila lasketaan ensin yhden asteen normaalilämpötilaa matalammaksi. Kun lämpötila on asettunut, nostetaan asetusrvoa asteella ja mitataan kuinka kauan kestää saavuttaa tavoitelämpötila halutulla tarkkuudella. Ulkolämpötilan perusteella nähdään, mihin kohtaan vaaka-akselia piste sijoittuu ennakkokäyrällä. Ennakkokäyrä voidaan muodostaa tämän yhden pisteen perusteella asettamalla suora kulkemaan mitatun pisteen kautta siten, että suora leikkaa ulkolämpötila-akselin normaalitasoa vastaavan lämpötilan kohdalla. Ulkolämpötilan tulisi periaatteessa olla askelkokeen aikana vakio, mutta kohtuullisiin tuloksiin päästään pienillä ulkolämpötilan vaihteluillakin.

### 7.1.2 Palautuslämmitysjen arviointi

Kokonaispalautuslämmitysaikaa arvioitaessa on otettava huomioon myös se, kuinka paljon sisälämpötila laskee säästöjakson aikana. Kuva 21 esittää ulkolämpötilan vaikutusta lämmitysaikaan normaali- ja sisälämpötilan eron *yhtä* astetta kohden. Toisin sanoen, jos sisälämpötila on asteen verran normaalilämpötilaa matalampi, voidaan kuvasta 21 lukea suoraan ennakkoaika, joka rakennusta pitää lämmittää, jotta sisälämpötila nousisi normaalilämpötilaan ennen käyttäjän saapumista rakennukseen. Esimerkiksi, jos ulkona on +10 °C lämmintä ja sisälämpötila on asteen verran normaalilämpötilaa matalampi, pitää lämmitys aloittaa 165 minuuttia ennen käyttäjän saapumista rakennukseen, jos ennakkokäyrä ei ole muuttunut.

Koska palautuslämmityksen aloittamisajankohta riippuu myös sisälämpötilan ja normaalilämpötilan erosta, pitää  $\Delta T$ :n (= normaalilämpötila – sisälämpötila) vaikutus ennakkoaikaan huomioida. Tämä riippuvuus voidaan oletetaan lineaariseksi siten, että lämmityksen kokonaisennakko lasketaan lopulta tulona:  $t_{ennakko} = \text{ennakko}(T_u) * \Delta T$ . Kokonaisennakon laskemiseksi  $\text{ennakko}(T_u)$  luetaan ennakkokäyrältä vallitsevan ulkolämpötilan kohdalta ja vastaavasti kerroin  $\Delta T$  saadaan normaalitason ja vallitsevan sisälämpötilan erona. Esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa +10 °C ja sisälämpötilan 0,8 °C normaalilämpötilaa matalampi, ennakkoaikaksi saadaan  $165 \text{ min} * 0,8 = 132 \text{ min}$ .



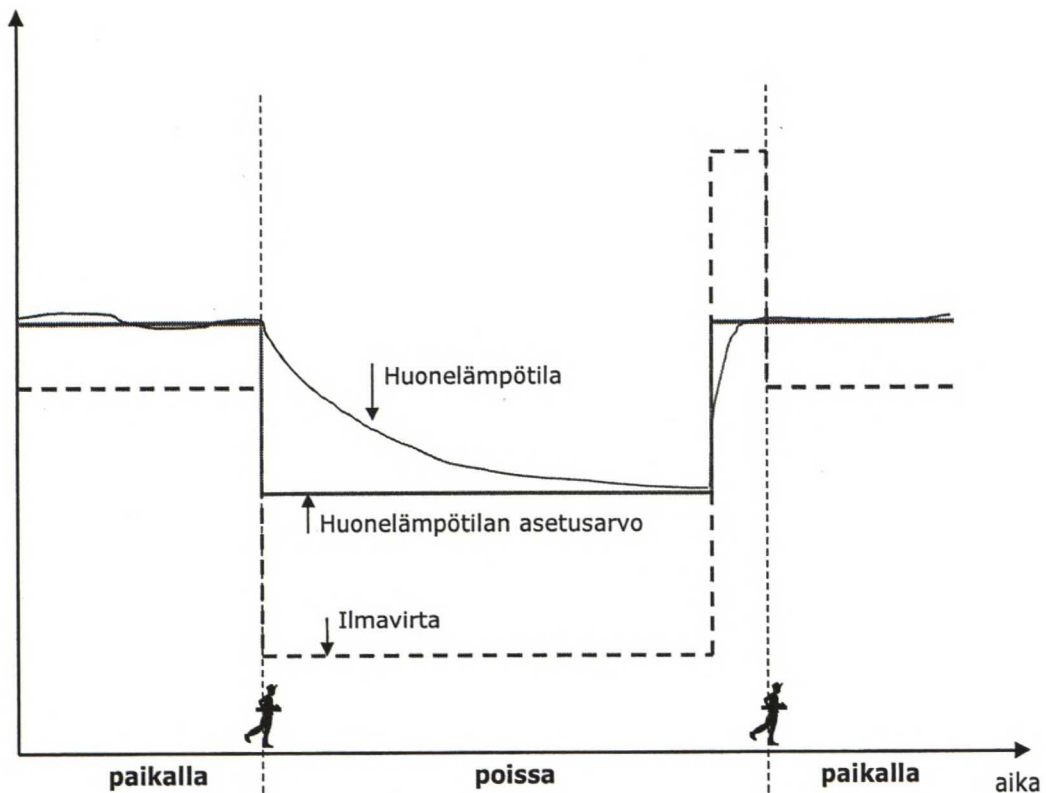
Algoritmi tarkkailee joka laskentakierroksella, onko rakennuksen käyttäjän oletettuun saapumisaikaan enemmän aikaa kuin palautuslämmityksen arvioidaan kestävän. Jos näin on, voidaan lämpötilan asetusarvoa pitää poissaolotasolla. Jos kuitenkin käyttäjän saapumisajankohtaan on vähemmän aikaa kuin kokonaisennakko edellyttää, aloitetaan lämmitys. Ennakko lasketaan joka kierroksella uudelleen, koska olosuhteet muuttuvat jatkuvasti ( $\Delta T$  kasvaa, kun sisälämpötila laskee viilennyksen aikana ja ulkolämpötila voi muuttua). Laskentaväliksi on valittu 10 minuuttia, mutta tätä aikaa voi muuttaa.

### 7.1.3 Lämpötilan ja puhallinnopeuden asetusarvojen laskenta

Kun palautuslämmitys kerran aloitetaan, sitä ei lopeteta ennen kuin lämpötila on noussut normaalitasolle. Lämmitys tehdään siten, että asetusarvo nostetaan normaalilämpötilaan heti eikä pehmentäen kuten algoritmin edellisessä versiossa. Pehmentämällä asetusarvo nousisi vähitellen normaalitasolle ja sisälämpötila seuraisi paremmin asetusta. On kuitenkin energiataloudellisesti kannattavampaa nostaa asetus heti lopulliseen tavoitearvoon, koska tällöin taataan mahdollisimman lyhyt lämmitysjakso täydellä teholla ja samalla maksimoidaan aika, joka asetusarvoa voidaan pitää poissaolotasolla. Näin energiansäästöjakso on suurimmillaan.

Lähestyttäessä rakennuksen käyttäjän saapumishetkeä, ilmanvaihtokoneen puhallinnopeutta nostetaan, jolloin lämmitysteho kasvaa ja rakennus tuulettuu samalla. Puhallinnopeus on minimissä käyttäjän ollessa poissa, mutta tuntia ennen käyttäjän saapumista nopeus nostetaan maksimiin. Mikäli ulkolämpötila on alle  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , puhallinnopeus nostetaan maksimiin jo 1,5 tuntia ennen käyttäjän saapumista rakennukseen, koska kovilla pakkasilla lämmitystehoa tarvitaan selvästi enemmän. Pidempi puhallinnopeuden maksimijakso kylmillä ilmoilla edesauttaa rakennuksen lämpiämistä (ilmalämmitteisissä rakennuksissa). Mikäli sisäilman lämpötila on kuitenkin noussut jo  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n päähän normaalitasosta, puhallinnopeus nostetaan vain puhalluksen normaalitasolle (sama taso kuin käyttäjän läsnäoloaikana).

Pienillä puhallinnopeuksilla rakennuksen lämmittäminen ei yleensä onnistu, pikemminkin rakennus jäähtyy, vaikka lämpötilan asetusarvo olisikin jo nostettu normaalitasolle. Tämä johtuu siitä, että ilmalämmitteisessä rakennuksessa lämmitysteho on riippuvainen tuloilman lämpötilan lisäksi ilmavirrasta. Kun sisälämpötila on saavuttanut normaalitason, puhallinnopeutta pidetään käyttäjän asettamalla normaalitasolla. Kuva 22 esittää miten rakennuksen sisälämpötila muuttuu, kun algoritmi tekee muutoksia lämpötilan ja puhallinnopeuden asetusarvoihin käyttäjän läsnä- tai poissaolon perusteella.



Kuva 22: Huonelämpötilan asetusarvon ja ilmavirran riippuvuus käyttäjän läsnäolosta  
(kuva: Sami Karjalainen, VTT).

#### 7.1.4 Oppimisen periaatteet

Rakennuksen lämmitystä takaisin normaalilämpötilaan voidaan pitää “epäonnistuneena”, jos jompi kumpi seuraavista toteutuu:

- rakennus ei lämpene riittävästi ennakkoaajassa
  - ennakkoaika liian lyhyt
- rakennus lämpenee liian nopeasti
  - ennakkoaika liian pitkä.

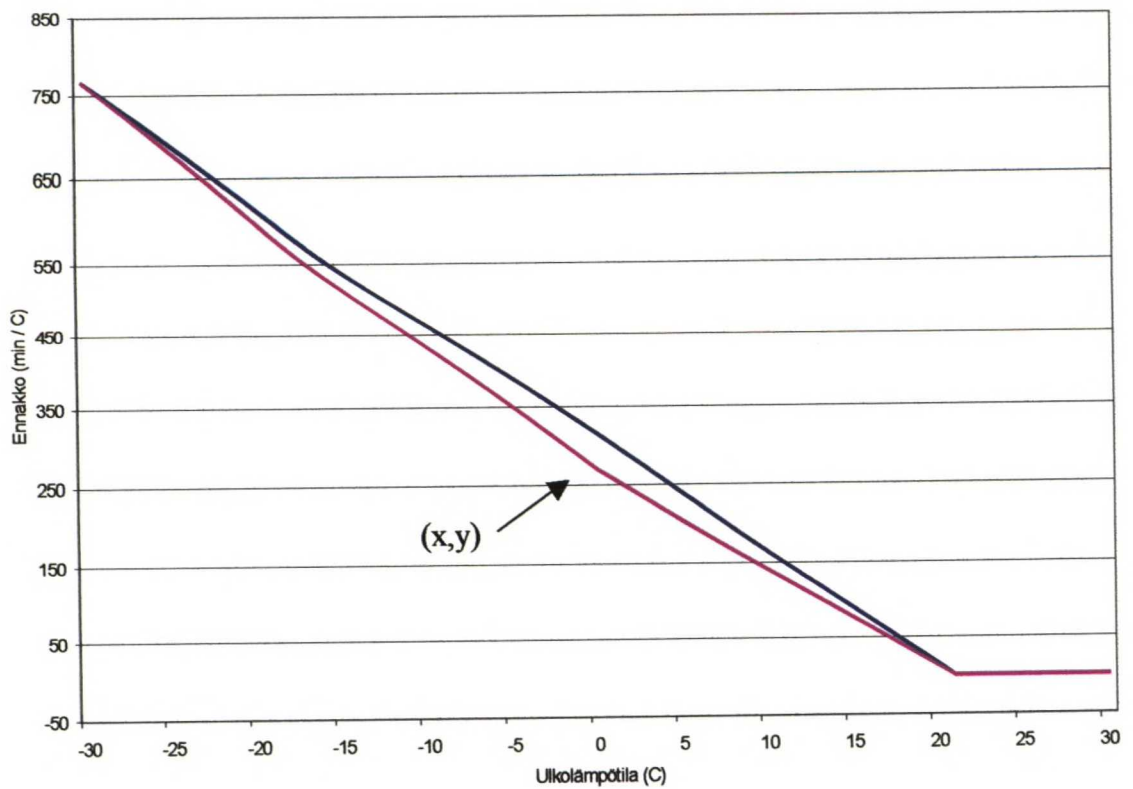
Näissä tapauksissa ennakon laskentaparametrit muuttuvat. Algoritmi tulkitsee lämpötilan toteutuneeksi, jos sisälämpötila on *OPPIMISRAJA*:ksi kutsutun arvon ( $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) päässä tavoitteesta. Oppimisrajan merkitys on siinä, että algoritmi tulkitsee tavoitelämpötilan toteutuneeksi, mikäli normaalilämpötila on saavutettu oppimisrajan tarkkuudella. Tällä on suora vaikutus oppimishetkeen, joten rajan merkitys on suuri. Tarvittaessa rajaa voi tiukentaa esimerkiksi  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een, mutta ainakin aluksi rajan on syytä olla hiukan suurempi.

Onnistuneesta tai epäonnistuneesta palautuslämmityksestä tapahtuu oppimista ja ulkolämpötila-ennakkokäyräriippuvuus muuttuu (kuva 21). Mikäli rakennus lämpenee liian nopeasti, voidaan muutos tähän riippuvuuteen laskea helposti. Tällöin ennakkoa voidaan pienentää sen verran, kuinka paljon etuajassa rakennus on lämmennyt normaalilämpötilaan. Lämmityksen alussa vallinnut lämpötilaero pitää kuitenkin huomioida. Siksi muutos skaalataan ennakkokäyrälle yhden asteen lämpötilaeroa kohden. Muutos tehdään lämmityksen alussa vallinnutta ulkolämpötilaa vastaavaan kohtaan. Esimerkiksi, jos rakennus on lämmennyt 50 minuuttia etuajassa ja lämmityksen alussa on ollut kaksi astetta viileämpää kuin lopussa, ennakkokäyrän parametria pienennetään  $(50\text{ min}) / (2\text{ }^{\circ}\text{C}) = 25\text{ min}/^{\circ}\text{C}$  siinä kohdassa, jonka lämmityksen alussa vallinnut ulkolämpötila määrää.

Jotta oppiminen vaikuttaisi mahdollisimman laajalle, muutos tehdään seuraavalla tavalla (esimerkki kuvassa 23). Jos kyseessä on ensimmäinen oppiminen:

1. Koko ennakkokäyrää muutetaan siten, että ensin asetetaan opittu piste paikalleen kohtaan  $(x,y)$ , kuvassa 23 piste  $(0, 270)$ .
2.  $(x,y)$ :n oikealle puolelle jäävät arvot lasketaan pisteiden  $(x,y)$  ja  $(\text{normaalilämpötila}, 0)$  määräämältä suoralta.
3. Vastaavasti  $(x,y)$ :n vasemmalle puolelle jäävät arvot lasketaan pisteiden  $(x,y)$  ja  $(-30, \text{MAXennakko})$  määräämältä suoralta.





Kuva 23: Ennakkokäyrän muuttuminen, alkuarvot ja opitut uudet arvot (alempi käyrä).

Kuvassa 23 oppiminen on tapahtunut 0 °C:ssa ja muutos on –45 minuuttia. Talo on siis lämmennyt 45 minuuttia etuajassa riittävällä tarkkuudella normaalitasolle (oletetaan, että lämmityksen alussa normaali- ja sisälämpötilan ero on ollut yksi aste). Koko käyrä on pakotettu kulkemaan opitun pisteen kautta.

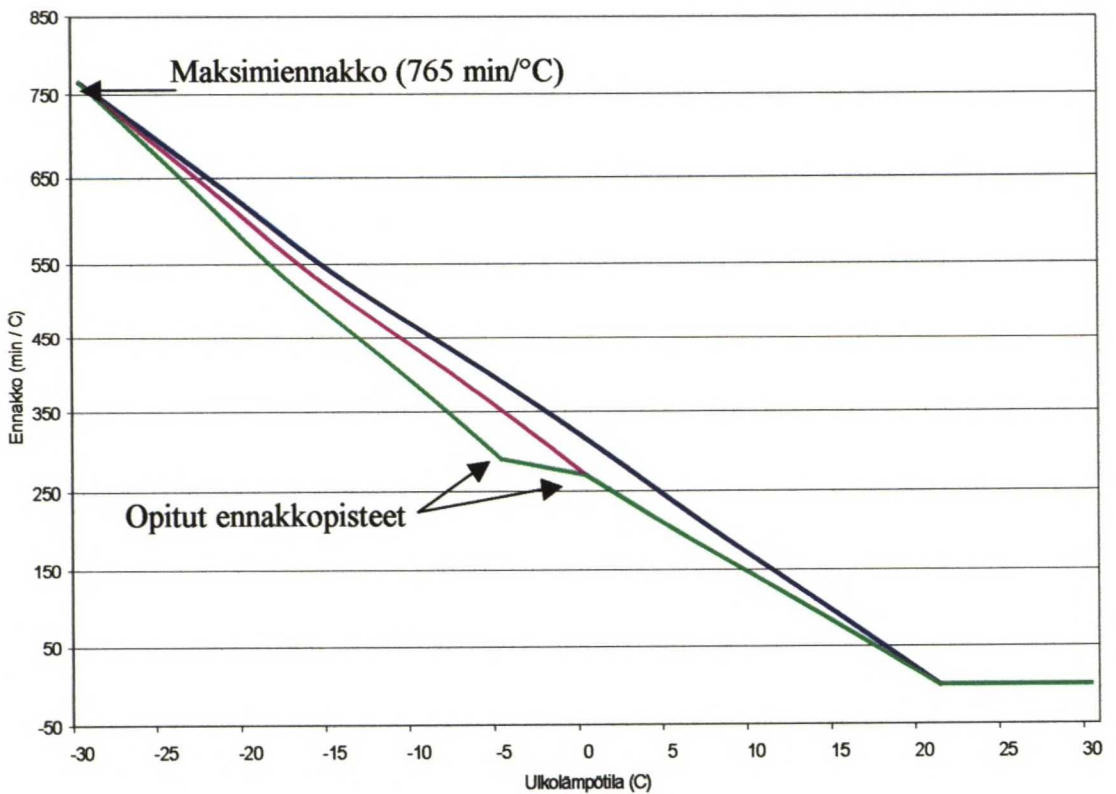
Jos rakennus ei lämpene riittävän nopeasti, muutetaan lämmityksen alussa vallinneen ulkolämpötilan määräämää kohtaa ennakkokäyrällä muuten samalla periaatteella, mutta kyseisen kohdan ennakkoa nostetaan. Jos sisälämpötila on käyttäjän saapumishetkellä vielä  $T_{\text{ero}}$ :n verran alempi kuin tavoitelämpötila eli normaalitaso, ennakkoa nostetaan ( $T_{\text{ero}}$  \* ennakko):n verran. Esimerkiksi:

- rakennuksen lämpötila on 0,7 °C jäljessä normaalilämpötilaa sillä hetkellä, kun käyttäjä saapuu rakennukseen, ja ulkolämpötila oli –5 °C lämmityksen alussa
- luetaan ennakkokäyrältä –5 °C:n kohdalta ennakkoaika ja kerrotaan tämä 0,7:llä
- saadaan minuuttimäärä, jolla alkuperäistä ennakkokäyrän parametria kasvatetaan

- skaalataan koko ennakkokäyrä siten, että muutos vaikuttaa mahdollisimman laajalle.

Käyrän skaalaus tapahtuu samalla tavalla kuin ennakkoa pienennettäessä.

Jos kyseessä ei kuitenkaan ole ensimmäinen oppimiskerta, käyrää muokataan opittujen pisteiden väliltä kuvan 24 mukaisesti. Toinen muutos kuvan 24 käyrällä on tehty ulkolämpötilaa  $-5\text{ °C}$  vastaavaan kohtaan. Uusin käyrä kulkee kuvassa alimmaisena välillä  $-30\text{ °C} - 0\text{ °C}$ . Vasemmalle skaalauksessa on käytetty toisena pisteenä ulkolämpötilaa  $-30\text{ °C}$  vastaavaa maksimiennakkopistettä ja oikealle skaalaus on tehty seuraavaan opittuun pisteeseen asti. Muuten käyrä on jätetty ennalleen.



Kuva 24: Ennakkokäyrä kahden muutoksen jälkeen (alimmainen käyrä).

Kaikki muutokset ennakkokäyrään on rajattu siten, että yksittäisen pisteen arvo voi muuttua kerralla enintään 50 % suuntaan tai toiseen. Tällä pyritään estämään mahdollisten virhetilanteiden merkittävä vaikutus. Virheiden vaikutusta voidaan vähentää algoritmiin liitettävällä painotetun pienimmän neliösumman menetelmällä toteutettavalla käyrän sovituksella, joka tehdään ennakkokäyrälle aina sen muuttuessa. Sovitus pehmentää käyrää ja painottaa enemmän opittuja pisteitä. Alkuarvojen merkitys vähenee eikä muokkautuva käyrä ole riippuvainen alussa annetusta maksimiennakosta.

### 7.1.5 Pienimmän neliösumman menetelmä

Pienimmän neliösumman menetelmää (PNS) voidaan soveltaa tässä ennakkokäyrän sovittamiseen. PNS-menetelmällä etsitään kertoimet eli parametrit polynomi- tai eksponentiaalifunktiolle, ja parametrien avulla käyrän arvo voidaan laskea eri pisteissä. Sovitusta käytetään, jotta oppimisen virheherkkyys pienenee ja toisaalta siksi, että oppimisella olisi mahdollisimman suuri vaikutus.

Yleisesti pienimmän neliösumman menetelmässä lähtökohtana on joukko pisteitä, joiden perusteella valitun mallin parametrit sovitetaan siten, että malli kuvaa koko datajoukon virheiden neliösumman mielessä mahdollisimman hyvin. Painotuksella voidaan kasvattaa joidenkin pisteiden painoarvoa (<http://www.control.hut.fi/Kurssit/AS-74.114/>).

Oletetaan, että mittaukset  $y_i$  kohdassa  $x_i$  toteuttavat seuraavan yhtälön (15)

$$y_i = k_0 + k_1 * x_i + \dots + k_{N-1} * x_i^{N-1} + k_N * x_i^N + e_i, \quad (15)$$

jossa

$k_j$  viritettävän käyrän parametrit ( $j = 0, 1, 2, \dots, N$ )

$e_i$  mittauksen  $y_i$  virhe.

Tällöin virhe  $e_i$  voidaan lausua muodossa

$$e_i = y_i - (k_0 + k_1 * x_i + \dots + k_{N-1} * x_i^{N-1} + k_N * x_i^N) \quad (16)$$



ja virheen neliösumma on  $e_i^2$ .

Kaavan (16) oikea puoli voidaan esittää matriisimuodossa kaavan (17) mukaisesti (Johansson 1993).

$$k_0 + k_1 * x_i + \dots + k_{N-1} x_i^{N-1} + k_N * x_i^N = \begin{bmatrix} x_i^N & x_i^{N-1} & \dots & x_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_N \\ k_{N-1} \\ \vdots \\ k_1 \\ k_0 \end{bmatrix} = \varphi_i^T \theta, \quad (17)$$

jossa

$\varphi_i^T$  regressorivektori ja  
 $\theta$  parametrivektori.

Kaikki mittaukset voidaan esittää kootusti matriisimuodossa. Parametrivektori  $\theta$  on sama kaikille mittauksille. Määritellään matriisit

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix}, \mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} \varphi_1^T \\ \varphi_2^T \\ \vdots \\ \varphi_L^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^N & \dots & x_1 & 1 \\ x_2^N & \dots & x_2 & 1 \\ \vdots & & \vdots & \\ x_L^N & \dots & x_L & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_L \end{bmatrix}, \quad (18)$$

jossa

$L$  mittausten lukumäärä.

Näillä merkinnöillä lineaarisen regression estimointimalliksi saadaan

$$\mathbf{Y} = \mathbf{\Psi}\theta + \mathbf{e}. \quad (19)$$

Tällöin estimointivirhevektori  $\mathbf{e}$  voidaan kirjoittaa muotoon

$$\mathbf{e} = \mathbf{Y} - \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad (20)$$

jossa  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$  on parametristimaatti.

Pienimmän neliösumman mielessä minimoitavaksi kustannusfunktiksi  $\mathbf{J}$  saadaan

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^L e_i^2 = \mathbf{e}^T \mathbf{e}. \quad (21)$$

Kustannusfunktio minimoidaan parametristimaatin suhteen. Minimi saadaan kustannusfunktion derivaatan nollakohdasta

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\hat{\boldsymbol{\theta}})}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} &= \frac{\partial}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} \left[ \left( \mathbf{Y} - \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} \right)^T \left( \mathbf{Y} - \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} \right) \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} \left[ \left( \mathbf{Y}^T - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \Psi^T \right) \left( \mathbf{Y} - \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} \right) \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} \left( \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \Psi^T \mathbf{Y} - \mathbf{Y}^T \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T \Psi^T \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial \hat{\boldsymbol{\theta}}} \left[ \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \hat{\boldsymbol{\theta}}^T (\Psi^T \mathbf{Y}) - (\Psi^T \mathbf{Y})^T \hat{\boldsymbol{\theta}} + \hat{\boldsymbol{\theta}}^T (\Psi^T \Psi) \hat{\boldsymbol{\theta}} \right] \\ &= \mathbf{0} - \Psi^T \mathbf{Y} - \Psi^T \mathbf{Y} + 2 \Psi^T \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ &= -2 \Psi^T \mathbf{Y} + 2 \Psi^T \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} \\ &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (22)$$

Ratkaistaan yhtälöstä parametristimaattivektori  $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ :

$$\begin{aligned} 2 \Psi^T \Psi \hat{\boldsymbol{\theta}} &= 2 \Psi^T \mathbf{Y} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}} &= (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \mathbf{Y} \end{aligned} \quad (23)$$

Ratkaisuksi saadaan todellisia parametreja ( $\theta$ ) pienimmän neliösumman mielessä parhaiten estimoima parametrivektori. Tämän avulla voidaan virittää käyrä, jonka pisteet ovat mahdollisimman lähellä alkuperäisiä mittauksia.

### 7.1.6 Painotettu pienimmän neliösumman menetelmä

Painotettu pienimmän neliösumman menetelmä (PPNS) soveltuu tilanteisiin, joissa mittauksilla on eri painoarvo. Jos joitakin mittauksia pidetään esimerkiksi luotettavampina kuin muita, niille voidaan antaa suuremmat painoarvot kuin muille mittauksille. Vastaavasti uudempia mittauksia voidaan painottaa enemmän kuin vanhoja, jolloin painona voidaan käyttää eksponentiaalista unohduskerrointa. PPNS-menetelmässä virheiden neliöitä painotetaan eri kohdissa erilaisilla painokertoimilla  $w_j$ . Kustannusfunktio saa näin muodon

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= e_1^2 w_1 + e_2^2 w_2 + \dots + e_L^2 w_L = \\ &= [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_L] \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & w_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_L \end{bmatrix} = \mathbf{e}^T \mathbf{W} \mathbf{e}. \end{aligned} \quad (24)$$

Mikäli matriisi  $\mathbf{W}$  on positiividefiniitti, löydetään parametriestimaatti, joka minimoi kustannusfunktion painotetun pienimmän neliösumman mielessä

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{PPNS}} = (\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\Psi})^{-1} \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{W} \mathbf{Y}. \quad (25)$$

Tuloksena saadaan parametriestimaattivektori, joka virittää mallin parhaiten vastaamaan todellisia mittauksia.

Algoritmiin toteutettiin painotetun pienimmän neliösumman menetelmällä toimiva ennakkokäyrän sovitus, joka aktivoidaan jokaisen oppimistapahtuman yhteydessä. PPNS-menetelmä liitettiin algoritmiin kuitenkin vasta testiajojen loppuvaiheessa, joten sitä ei käytetty simuloinneissa tai METOP-talon testauksissa. Menetelmän vaikutusta ennakkokäyrään on havainnollistettu kohdan 7.3.2 lopussa sivulla 82.



### 7.1.7 Viihtyvyys rakennuksessa

Tässä esiteltävään algoritmin toiseen versioon sisältyy ns. taloudellisuus-viihtyisyys-kytkin, jolla järjestelmän käyttäjä voi valita algoritmin tehokkuustason (Karjalainen 2000). Kytkimellä käyttäjä voi valita haluamansa säästötason painottamalla joko taloudellisuutta tai viihtyisyyttä. Painotettaessa taloudellisuutta, lämpötilan pudotus käyttäjän ollessa poissa on suurempi kuin viihtyisyyttä painotettaessa. Taloudellisuus-viihtyisyys-taso vaikuttaa myös eri hetkillä käytettävään ilmapirran määrään, joten tason valinnalla on merkittävä vaikutus energiankulutukseen. On tärkeää huomata, että viihtyisyys rakennuksessa ei oleellisesti huonone, vaikka taloudellisuutta painotettaisiin 100-prosenttisesti. Järjestelmän käyttöliittymässä tulee huomioida taloudellisuus-viihtyisyys-kytkimen sisältyminen algoritmiin. Kytkin perustuu lähteessä (Kuntze ja Bernard 1998) esitettyyn tutkimukseen käyttäjän vaikutusmahdollisuuksista rakennuksen energiankulutukseen ja viihtyisyyteen.

### 7.2 Simuloinnit TRNSYS-ohjelmistolla

Oppivan algoritmin versiota muuttuvilmavirtaiseen järjestelmään testattiin simuloimalla algoritmin toimintaa ilmalämmitteisen tyyppikerrostalon kolmion lämmitysjärjestelmässä. Rakennus ja simulointiympäristö ovat samat kuin vakioilmavirtaisessa tapauksessa (kuvattu tarkemmin kohdassa 6.2).

#### 7.2.1 Simuloinnin kuvaus

Muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä pitää määritellä algoritmillemme lämpötilan normaali- ja poissaolotasot sekä ilmapirralle normaali-, poissaolo- ja tehostusilmapirrat. Simuloinneissa käytetyt arvot on esitetty taulukossa 10 (Karjalainen 2001b). Näiden arvojen toteutuminen edellyttää sitä, että asukkaat ovat valinneet taloudellisuus-viihtyisyys-kytkimellä rakennuksen viihtyisyystasoksi 0 % (täysi taloudellisuus).

*Taulukko 10: Simuloinneissa käytetyt lämpötilan ja ilmapirran asetusarvot.*

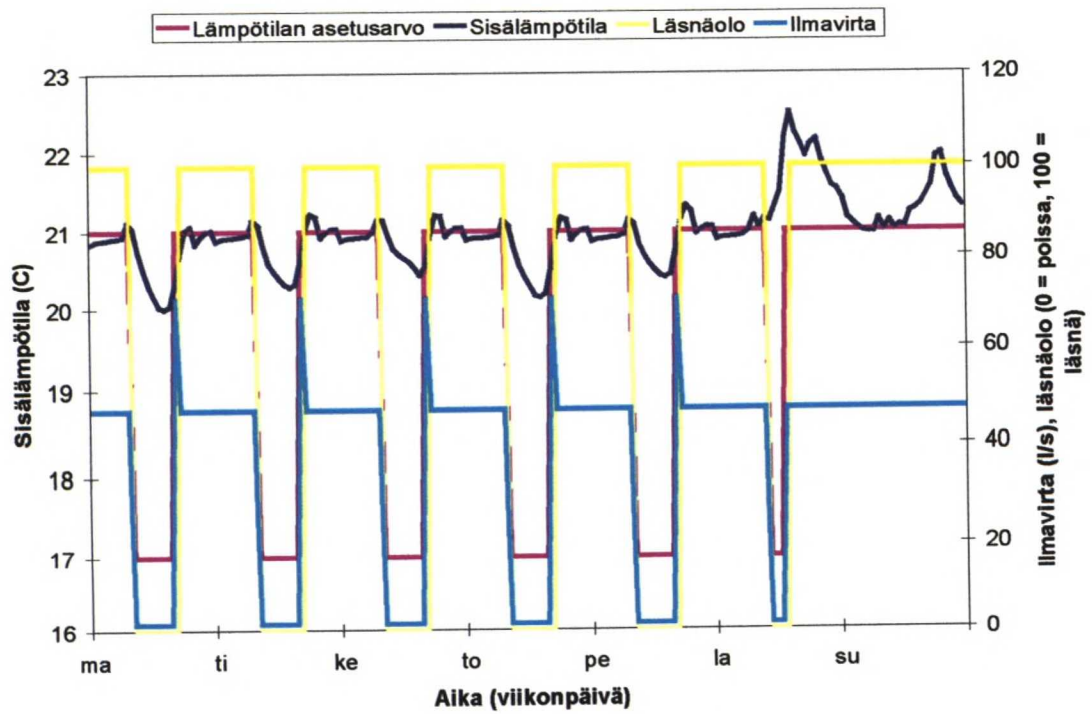
Asetusarvo	Lämpötila °C	Ilmapirta dm <sup>3</sup> /s	Vaihtoja 1/h
Normaalitaso	21	47	0,85
Poissaolotaso	17	1,4	0,03
Tehostustaso (maksimi)	21	71	1,3

Simulointijakso on sama 17 viikkoa kuin vakioilmavirtaisessa tapauksessa. Energiankulutusta tarkkaillaan 15 viimeisellä viikolla, jolloin algoritmi on jo mukautunut rakennukseen ja asukkaiden läsnäolorytmiin. Tuloilman lämpötilan maksimiarvo on rajattu simuloinneissa  $+45\text{ °C}$ :een, mutta alarajaa ei ole. Simuloinneissa tarkastellaan kahta eri tapausta.

Ensimmäisessä tapauksessa asukkaat ovat valinneet taloudellisuus-viihtyisyys-tasoksi 100 %:n viihtyisyyden. Tällöin algoritmi ei muuta lainkaan lämpötilan tai ilmavirran asetusarvoa normaalitasosta, joten rakennuksessa vallitsee koko ajan normaaliolosuhteet ( $21\text{ °C}$  ja  $47\text{ dm}^3/\text{s}$ ). Toisessa tapauksessa asukkaat ovat valinneet taloudellisuus-viihtyisyys-tasoksi 0 %:n viihtyisyyden (pikemminkin 100 %:n taloudellisuuden). Tässä tapauksessa taulukon 10 arvot toteutuvat. Simuloinneissa oletetaan, että asukkaat ovat poissa arkisin kello 8 – 17 ja lauantaisin 10 – 14 välisenä aikana. Läsnäolon aistii esimerkiksi läsnäoloanturi, joka on liitetty järjestelmään.

### **7.2.2 Simulointitulokset**

Simulointituloksia tarkastellaan viikon 16 osalta. Jakson aikana vallinnutta ulkolämpötilaa esittää kuva 8 sivulla 37. Ensimmäisessä tapauksessa lämpötila ja ilmavirta pysyvät vakioarvoissaan. Algoritmin ohjaamana lämpötila ja ilmavirta muuttuvat kuvan 25 mukaisesti asukkaiden läsnäolotiedon perusteella.

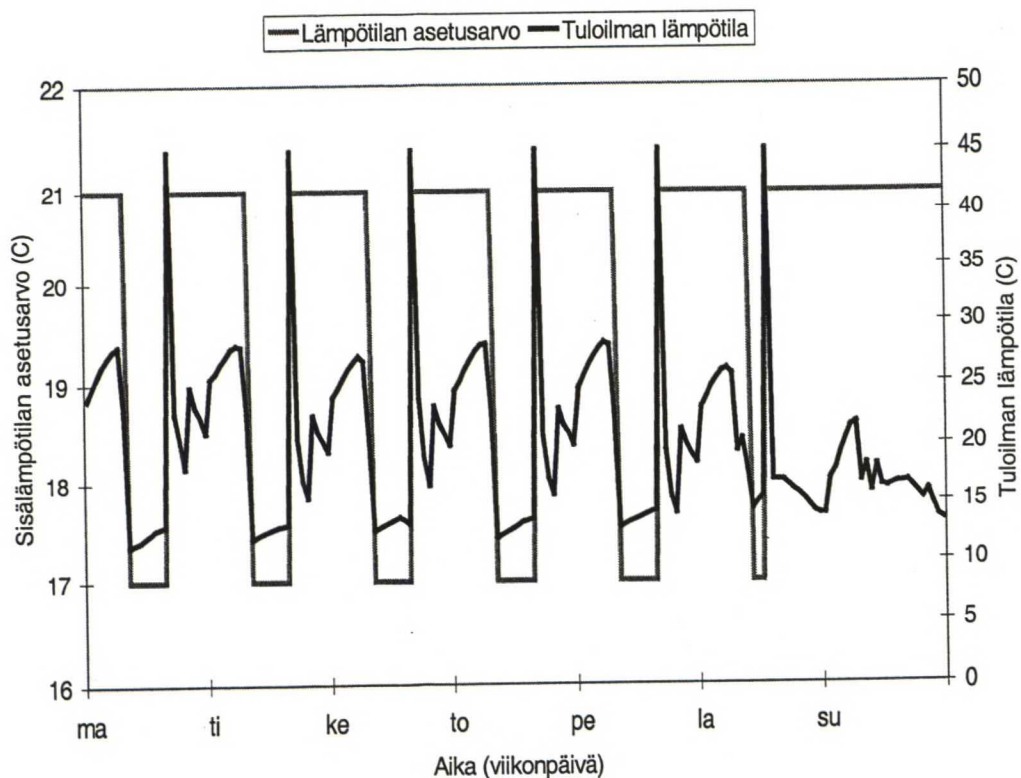


Kuva 25: Lämpötilan, ilmavirran ja asetusarvojen muuttuminen viikolla 16.

Kuvasta 25 nähdään, että sisälämpötila on joka kerta palautunut normaaliksi ennen asukkaan saapumista rakennukseen. Lisäksi lauantaita lukuun ottamatta ilmavirta on ollut maksimiteholla tunnin juuri ennen asukkaan saapumista. Näin sekä ilman laatu että lämpötila ovat ihanteellisella tasolla aina, kun asukas on läsnä. Lauantaina ilmavirran tehostusta ei tarvita, koska lämpötila ei ole laskenut normaalitason alle säästöjaksolla.

Kuva 26 esittää tuloilman lämpötilan muuttumista lämpötilan asetusarvon muuttuessa (viikko 16). Tuloilman lämpötila laskee alimmillaan noin +12 °C:een ja korkeimmillaan ylärajalle +45 °C.





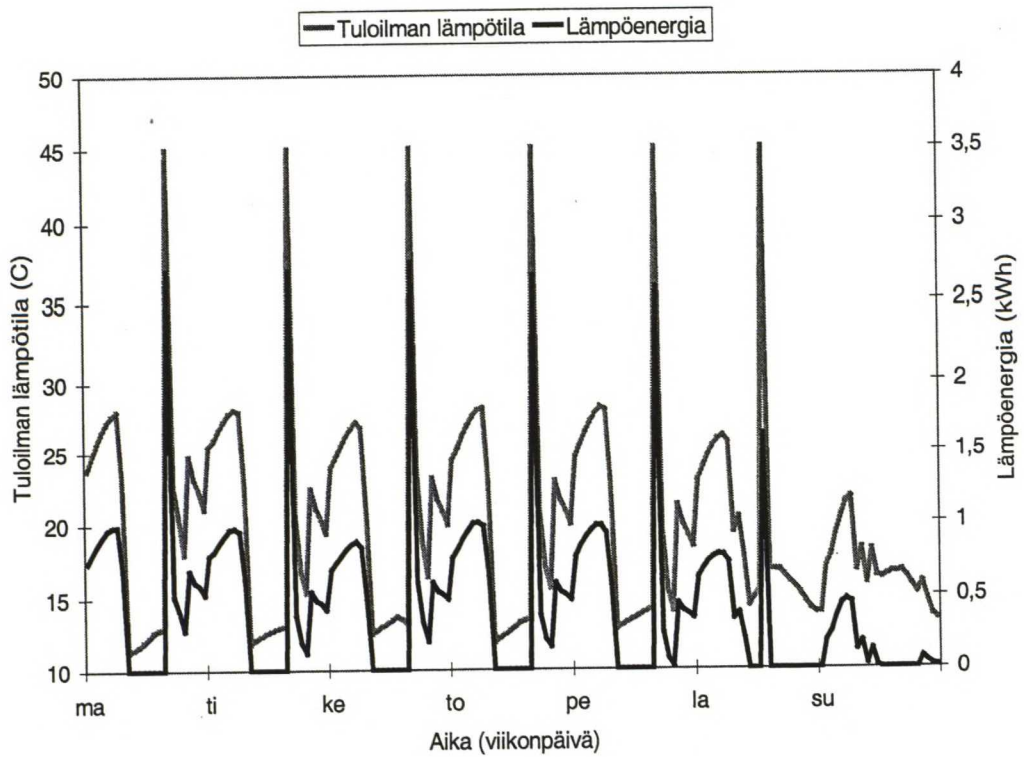
Kuva 26: Sisälämpötilan asetusarvo ja tuloilman lämpötila viikolla 16.

Kuvaan 27 on piirretty tuloilman lämpötilan lisäksi lämmitysjärjestelmän kuluttama lämpöenergia viikolla 16. Nähdään, että lämpöenergian suurimmat arvot ovat hieman yli 2,5 kWh ja että säästöjaksoilla lämmitystä ei tarvita lainkaan.

Taulukkoon 11 on laskettu lämpöenergian kulutukset molemmissa simulointitapauksissa 15 viimeiseltä viikolta.

Taulukko 11: Energiankulutuksen vertailu simulointitapauksissa 15 viimeiseltä viikolta.

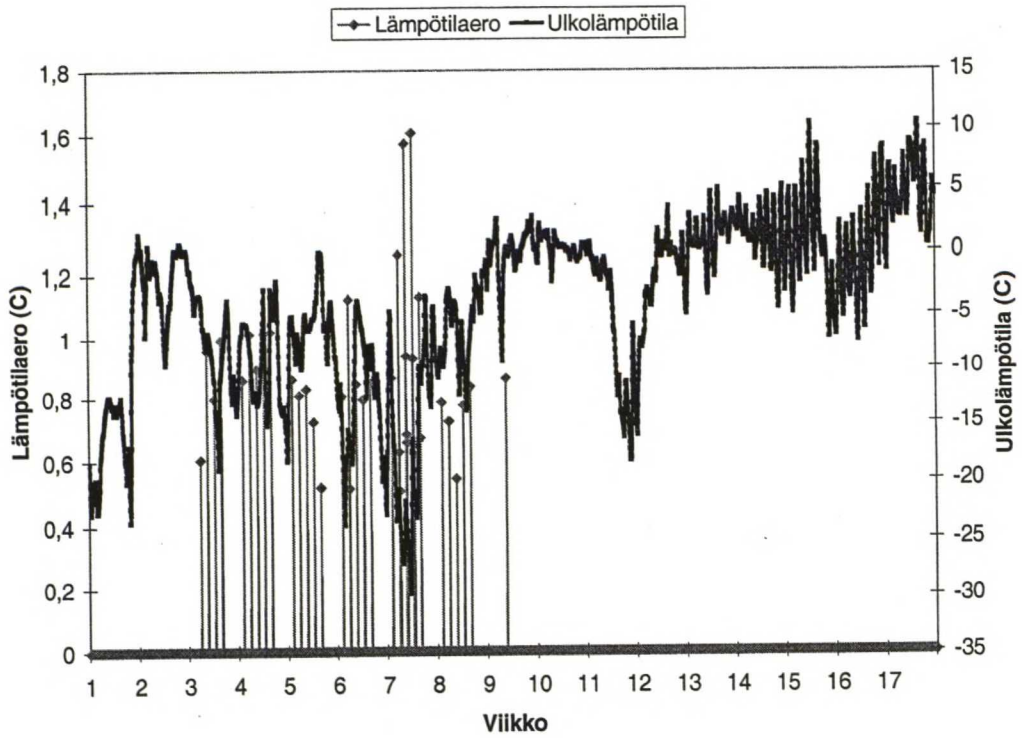
Jakso	Vakiolämpötilainen	Algoritmilla ohjattu	Ero
Energiankulutus	1911 kWh	1507 kWh	404 kWh / 21 %
Puhaltimen sähköenergian kulutus	360 kWh	277 kWh	83 kWh / 23 %



Kuva 27: Tuloilman lämpötila ja lämpöenergia viikolla 16.

Energiankulutuslaskelmien perusteella muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä algoritmillä voidaan saavuttaa 21 %:n säästö rakennuksen lämpöenergiassa. Lisäksi ilmanvaihtojärjestelmän puhaltimen sähköenergiassa saavutetaan 23 %:n säästöt. Mikäli taloudellisuusviihtyisyys-tasoksi valitaan 30 %:n taloudellisuus, saavutetaan lämpöenergiassa noin 11 %:n säästöt (puhaltimen sähköenergiassa 16 %). 70 %:n taloudellisuustasolla saavutetaan noin 20 % säästöt lämpöenergiassa (puhaltimen sähköenergiassa 23 %). Mikäli taloudellisuutta painotetaan kytkimellä yli 50 %, viihtyisyys rakennuksessa saattaa ajoittain heikentyä hieman.

Kuva 28 esittää simulointijaksolta niitä hetkiä, jolloin rakennuksen viihtyisyys on algoritmin käytön takia kärsinyt. Kuvaan 28 on piirretty lämpötilan asetusarvon ja todellisen sisälämpötilan ero niillä hetkillä, joilla asukas on läsnä. Arvoista on poistettu alle 0,5 °C:n erot, koska ne voivat johtua lämmitysjärjestelmän säädön epätarkkuuksista. Lisäksi negatiiviset lämpötilaerot on poistettu (sisälämpötila asetusarvoa suurempi), koska tällöin viihtyisyyden ei katsota huononevan algoritmin ominaisuuksien takia.



Kuva 28: Viihtyisyyden muutos rakennuksessa läsnäoloaikana.

Kuva 28 on hyvin samankaltainen kuin kuva 12 (sivulla 41), jossa esitetään vakioilmavirtaisen järjestelmän vastaava kuvaaja. Nähdään, että myös muuttuvailmavirtaiseen järjestelmään tarkoitettu algoritmi oppii rakennuksen dynamiikan ja osaa ennustaa palautuslämmitysajan oikein tarkastelujakson loppupuolella. Algoritmien vertailua kuitenkin haittaa se, että vakioilmavirtatapauksessa kProfiili on alunperinkin TRNSYS-simulointia varten sovitettu (simuloinnin alussa), kun muuttuvailmavirtaisessa tapauksessa algoritmin ennakkokäyrä on alunperin suunniteltu METOP-taloa varten. METOP-talo ja simuloitu rakennus ovat kuitenkin dynamiikaltaan täysin erilaisia. Voidaankin sanoa, että muuttuvailmavirtaisen järjestelmän algoritmi oppii rakennuksen dynamiikan nopeammin kuin vakioilmavirtaisen järjestelmän algoritmi. Rakennuksen keskimääräiseksi viihtyisyysprosentiksi koko simulointijaksolla saadaan 99,4 % (vakioilmavirtaisella algoritmilla 99,2 %).



### 7.3 Tulokset koekohteesta

Uutta algoritmia testattiin METOP-matalaenergiatoimistotalossa Espoon Otaniemessä syksyllä 2001 (rakennuksen ja lämmitysjärjestelmän kuvaus kohdassa 6.3.1). Jakso oli riittävän pitkä, jotta rakennuksen dynamiikan oppimisen etenemistä voitiin seurata. Myös algoritmin toimintaa muuttuvissa olosuhteissa voitiin tarkkailla. Testausjakson aikana ulkolämpötila vaihteli + 20 °C ja – 6 °C:een välillä. Ulkolämpötila-alue kattaa noin puolet algoritmin palautuslämmityksen ennakkokäyrästä.

#### 7.3.1 Algoritmin testaaminen koekohteessa

Algoritmi ajastettiin laskemaan ja päivittämään asetusarvot sisäilman lämpötilalle ja ilmanvaihtokoneen puhallinnopeudelle 10 minuutin välein. Myös eri suureiden mittaukset ja tietojen talletukset lokitiedostoihin tapahtuivat 10 minuutin välein. Päivitykset ilmanvaihtolämmitysjärjestelmän asetusarvoihin ajettiin kenttäväylän kautta vain silloin, kun asetusarvot muuttuivat. Erillisillä makroilla ja niihin liitetyillä tarkistuksilla pyrittiin varmistamaan se, että asetusarvot todella päivittyivät oikein. Aikaisempien testauksien aikana oli huomattu puutteita rakennusautomaatiojärjestelmän toiminnassa, joten järjestelmän toimintavarmuutta pyrittiin parantamaan entisestä.

Algoritmin palautuslämmityksen ennakkokäyrä alustettiin kuvan 21 alkuarvojen mukaiseksi. Alkuarvot tälle käyrälle oli laskettu likimääräisesti kevään tulosten perusteella. Tavoitteena oli käyrän mahdollisimman nopea mukautuminen oikeaan suuntaan, toisin sanoen, rakennuksen dynamiikan oppiminen.

Testausjakson aikana normaalilämpötilaksi valittiin 22 °C ja poissaololämpötilaksi 18 °C. Läsnaolotieto tuotettiin ennalta määrätyn aikataulun mukaisesti tietokoneelta. Uutta algoritmia testattaessa käytettiin samaa läsnaolorytmiä kuin kevään 2001 testeissä vakioilmavirtaisen järjestelmän algoritmilla (kts. taulukko 9, sivu 49).



Ilmavirran asetusarvon on mahdollista saada kolme eri arvoa, jotka ovat ”normaali-”, ”säästö-” ja ”maksimipuhallus”. Normaalialia ilmavirtaa käytetään, kun rakennuksessa oleskellaan, säästöilmavirtaa, kun rakennuksessa ei olla läsnä ja maksimi-ilmavirtaa tarvittaessa juuri ennen käyttäjän saapumista (lämmityksen tehostamiseksi ja rakennuksen tuulettamiseksi). Taulukkoon 12 on merkitty METOP-talon ilmanvaihtokertoimet ja ilmavirrat, joita edellä esitetyt algoritmin ilmavirtatasot vastaavat.

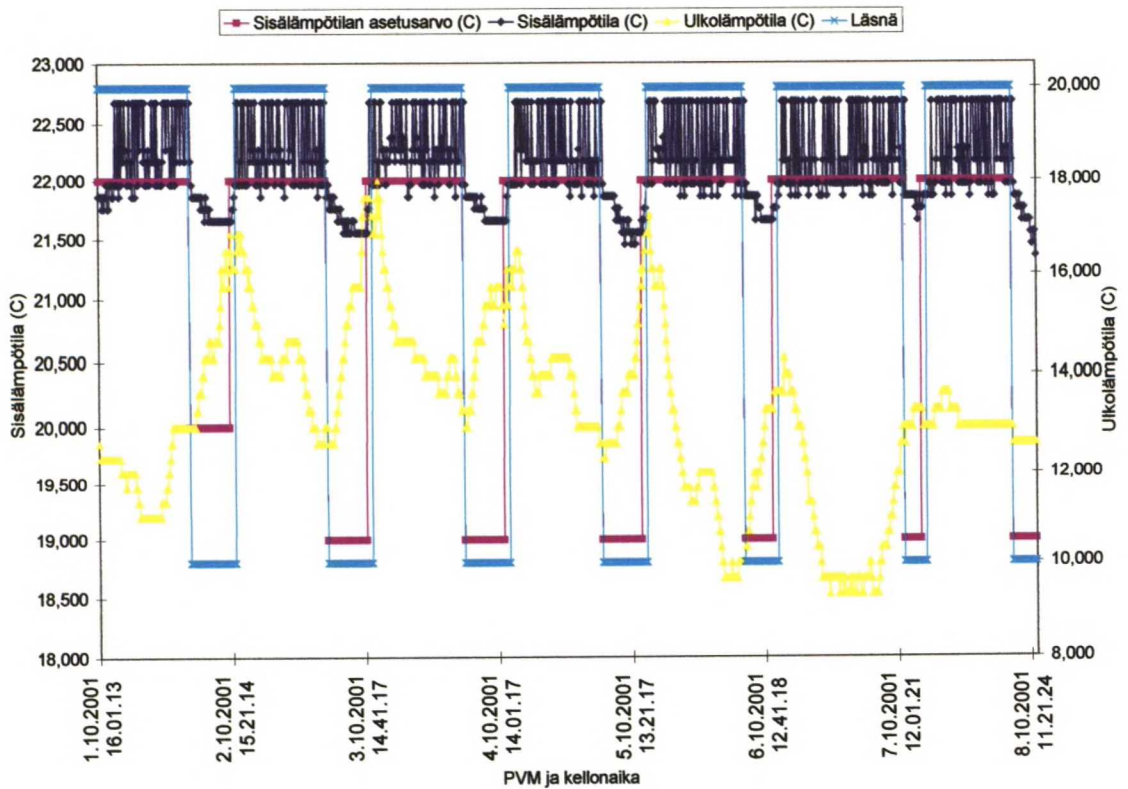
*Taulukko 12: METOP-talon ilmanvaihtokertoimet ja -määrät algoritmin eri asetusarvoilla.*

Taso	Ilmanvaihtokerroin [1 / h]	Ilmavirta [dm <sup>3</sup> / s]
Normaali	1,3	75
Säästö	0,6	35
Maksimi	2,0	116

Ilmanvaihtokertoimet ovat suuria verrattuna tavanomaisiin rakennusten arvoihin tai Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 (Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto – Määräykset ja ohjeet 1987) mukaisiin ilmanvaihdon ohjearvoihin. Rakentamismääräyskokoelman mukaan asuinrakennuksissa ilmanvaihtokertoimen tulee olla oleskeluaikana normaalikorkuisissa huoneissa vähintään 0,5 1/h. METOP-talossa pieninkin mahdollinen ilmavirta (säästötaso) ylittää tämän ohjearvon. On kuitenkin huomioitava METOP-talon lämmitysmuoto, ilmalämmitys. Koska lämmin ilma nousee ylöspäin, on ilmalämmitteisissä rakennuksissa syytä käyttää normaalia suurempaa ilmavirtaa, jotta lämpö tuntuu myös lattiatasolla.

### 7.3.2 Testitulokset

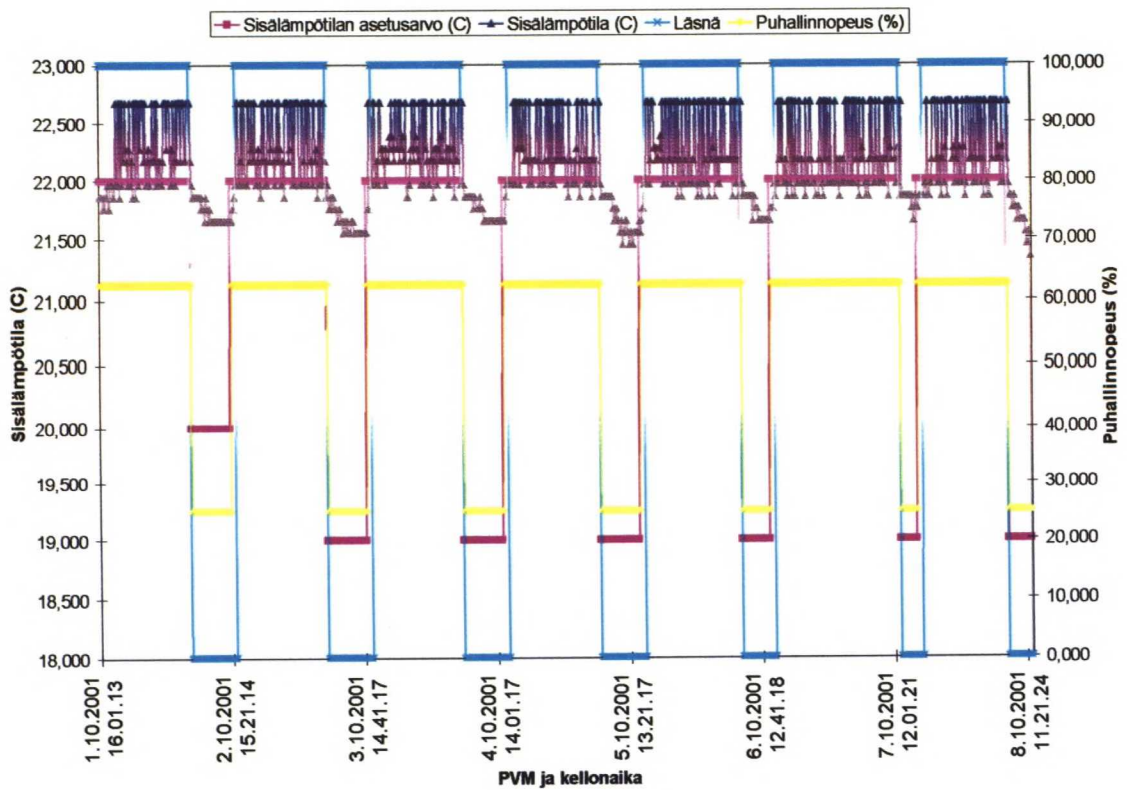
Syksyn ensimmäisiä testaustuloksia ajalta 1.-8.10.2001 esittää kuva 29. Kuvaan on piirretty sisälämpötilan asetusarvo, sisälämpötila, ulkolämpötila sekä läsnäolotieto, jonka perusteella algoritmi pääättelee asetusarvot. Läsäolokäyrän ollessa ylätasolla, rakennuksen käyttäjä on läsnä, ja kun käyrä on alatasolla, käyttäjä on poissa.



Kuva 29: Testausjakson 1.-8.10.2001 tulokset.

Nähdään, että ulkolämpötila on niin korkea, että sisälämpötila ei laske kovin nopeasti hyvin eristetyssä rakennuksessa säästöjakson aikana. Sisälämpötila laskee enintään noin  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  alle normaalitason lämpötilan ( $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) kahdeksan tunnin säästöjaksojen aikana. Tosin on huomattava, että sisälämpötila on ennen säästöjaksoa hieman normaalitason yläpuolella, joten lämpötilan kokonaispudotus on enimmillään noin  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n luokkaa. Ulkolämpötilan keskiarvo viikon jakson aikana on noin  $+13,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Lämpötilan asetusarvon ja läsnäolon käyrät kulkevat lähes rinnakkain kuvassa, mikä tarkoittaa sitä, että palautuslämmitysaika on hyvin lyhyt joka kerta. Sisälämpötilan arvoja tarkkailtaessa nähdään, että sisälämpötila on jokaisen palautuslämmityskerran lopussa algoritmin ”oppimisrajan” sisällä normaalitasosta. Oppimisraja on tässä  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Voidaan siis sanoa, että viihtyisyys rakennuksessa ei ole laskenut lainkaan käyttäjän ollessa läsnä. Kuva 30 esittää saman jakson tuloksia puhallinnopeuden asetusarvolla täydennettynä ilman ulkolämpötilaa.

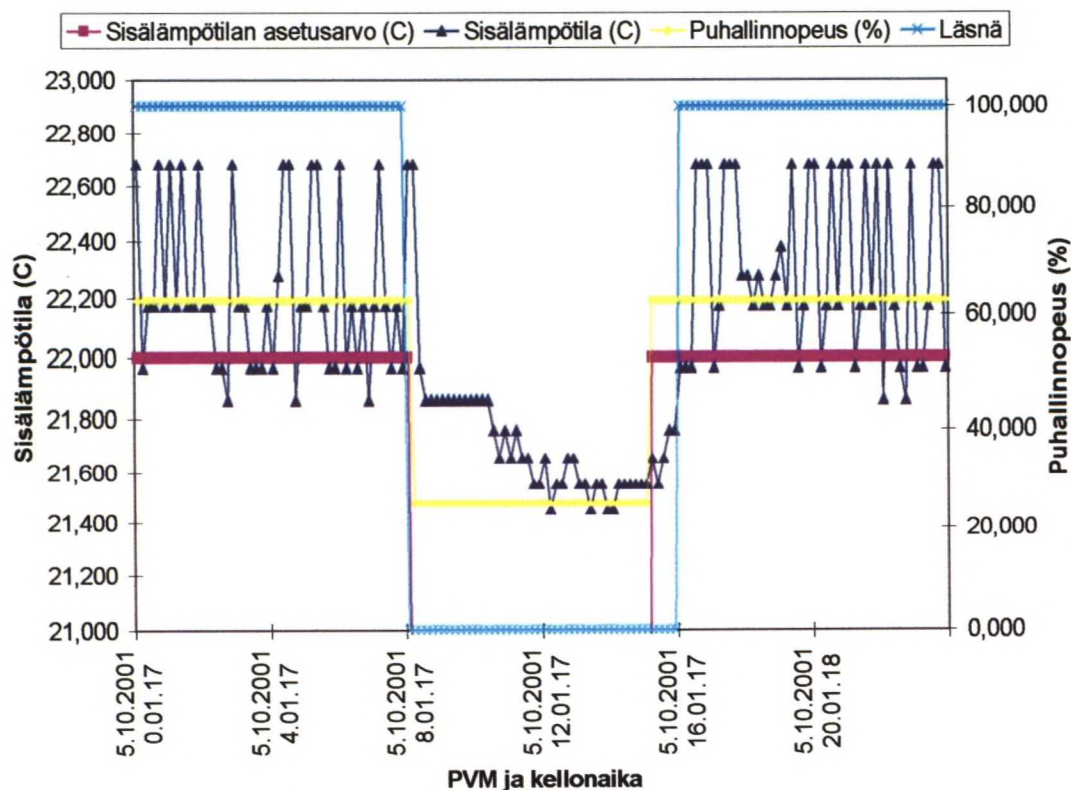


Kuva 30: Sisälämpötilan ja puhallinnopeuden ohjaukset 1.-8.10.2001.

Nähdään, että puhallinnopeuden asetusarvo pysyy lähes koko säästöjakson minimitasolla. Puhallinnopeus nousee normaalitasolle yhtä tuntia ennen käyttäjän saapumisajankohtaa. Lämmityksen tehostusta ei tarvita, koska sisälämpötila ei ole laskenut kovinkaan paljoa, joten puhallinnopeuden palauttaminen normaalitasolle riittää. Näin taataan rakennuksen tuulettuminen ennen käyttäjän saapumista.

Kuva 31 esittää algoritmin toimintaa yksittäisenä päivänä tarkastelujaksolla. Kuvasta nähdään selvemmin, miten puhallinnopeuden ja myös lämpötilan asetusarvot nousevat normaalitasolle tuntia ennen käyttäjän saapumista rakennukseen. Palautuslämmitykseen arviolta kuluvan ajan kasvaminen yli sen ajan, jonka arvioidaan kuluvan käyttäjän saapumiseen, aktivoi lämpötilan asetusarvon noston takaisin normaalitasolle. Kuitenkin, kuten kuvasta 31 nähdään, lämpötilan asetusarvo palautetaan normaalitasolle viimeistään tuntia ennen käyttäjän saapumista, vaikka arvioitu ennakkoaika olisi kuinka lyhyt hyvänsä.

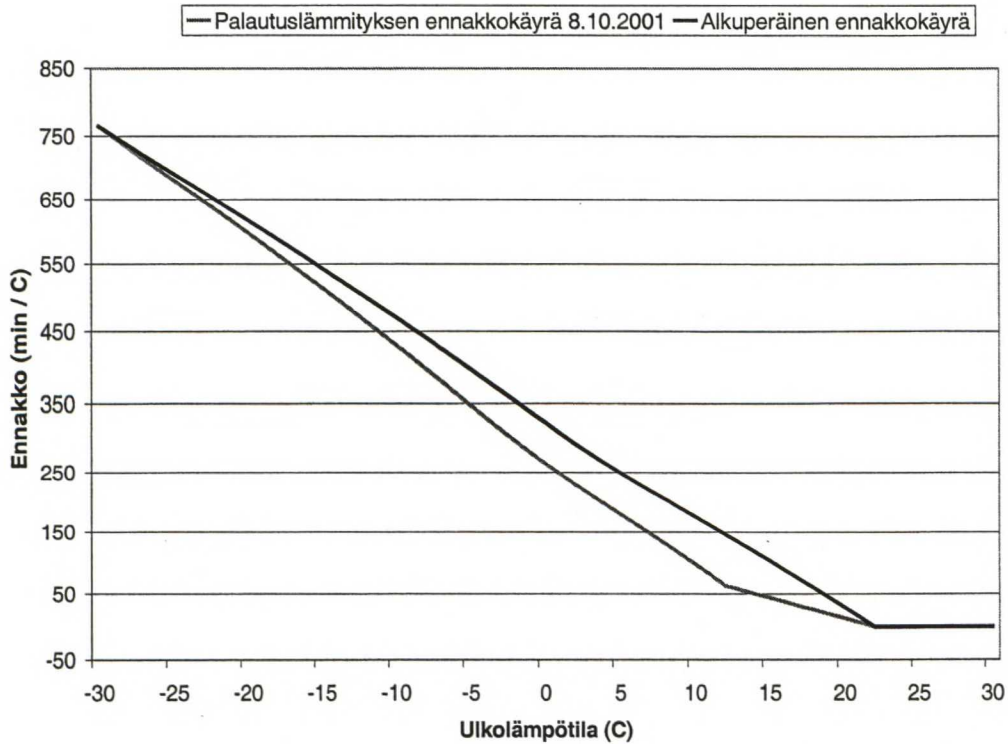




Kuva 31: Algoritmin toiminnan tarkastelu yksittäisenä vuorokautena (5.10.2001).

Säästöjaksojen aikana sisälämpötila ei siis juurikaan laskenut jaksolla 1.-8.10.2001. Tästä syystä myöskään palautuslämmityksen ennakkokäyrä ei muuttunut paljoa. Testituloksista voidaan päätellä, että ennakkokäyrän olisi pitänyt laskea etenkin alueella 9 – 18 °C, koska ulkolämpötila pysytteli kyseisellä välillä testijakson aikana ja toisaalta laskea sen takia, että sisälämpötila nousi tavoitetasolle ennen käyttäjän saapumista (liian aikainen rakennuksen lämmittäminen). Kuva 32 esittää muuttunutta ja alkuperäistä ennakkokäyrää.

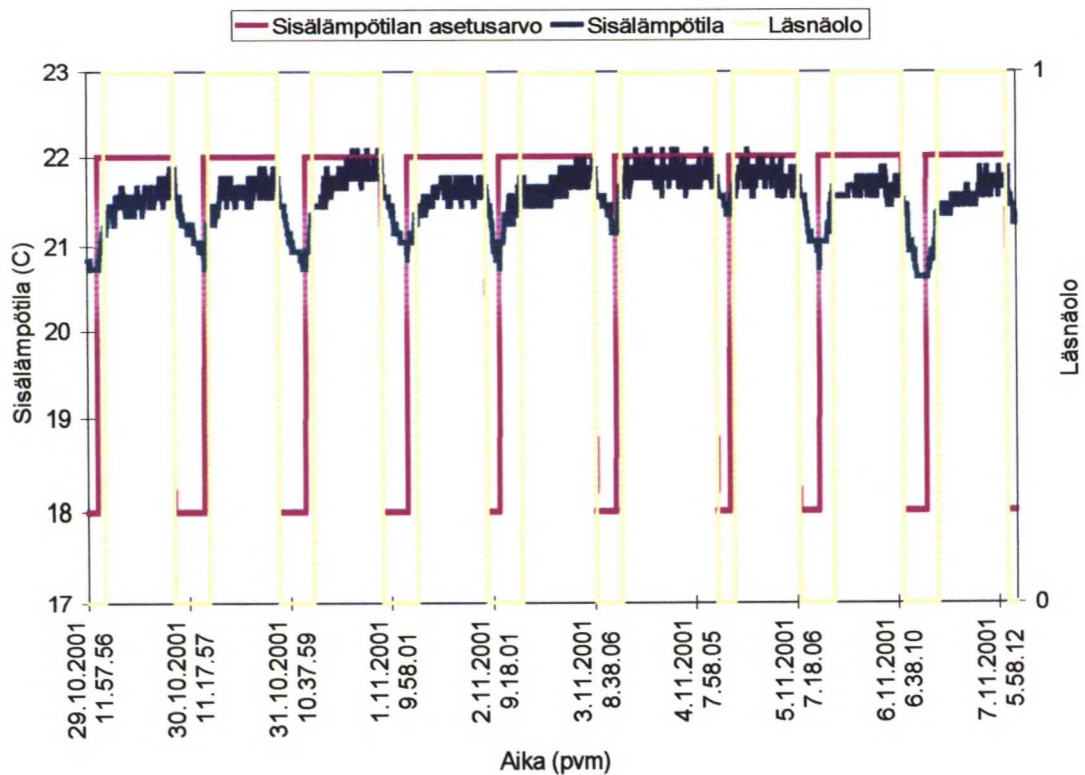




Kuva 32: Ennakkokäyrän muuttuminen METOP-matalaenergiatalossa 1.-8.10.2001.

Kuvasta 32 nähdään, että ennakkokäyrän muuttuminen yhdessä kohtaa (+12 °C) on vaikuttanut kaikkialle käyrään. Tämä on tärkeää, koska muuten oppimista pitäisi tapahtua joka kohdassa vaaka- eli ulkolämpötila-akselia. Tämä edellyttäisi koko lämpötila-alueen läpikäymistä, toisin sanoen oppiminen voisi kestää vuoden. Toteutettu oppimistapa nopeuttaa algoritmin rakennuksen dynaamisten ominaisuuksien oppimista.

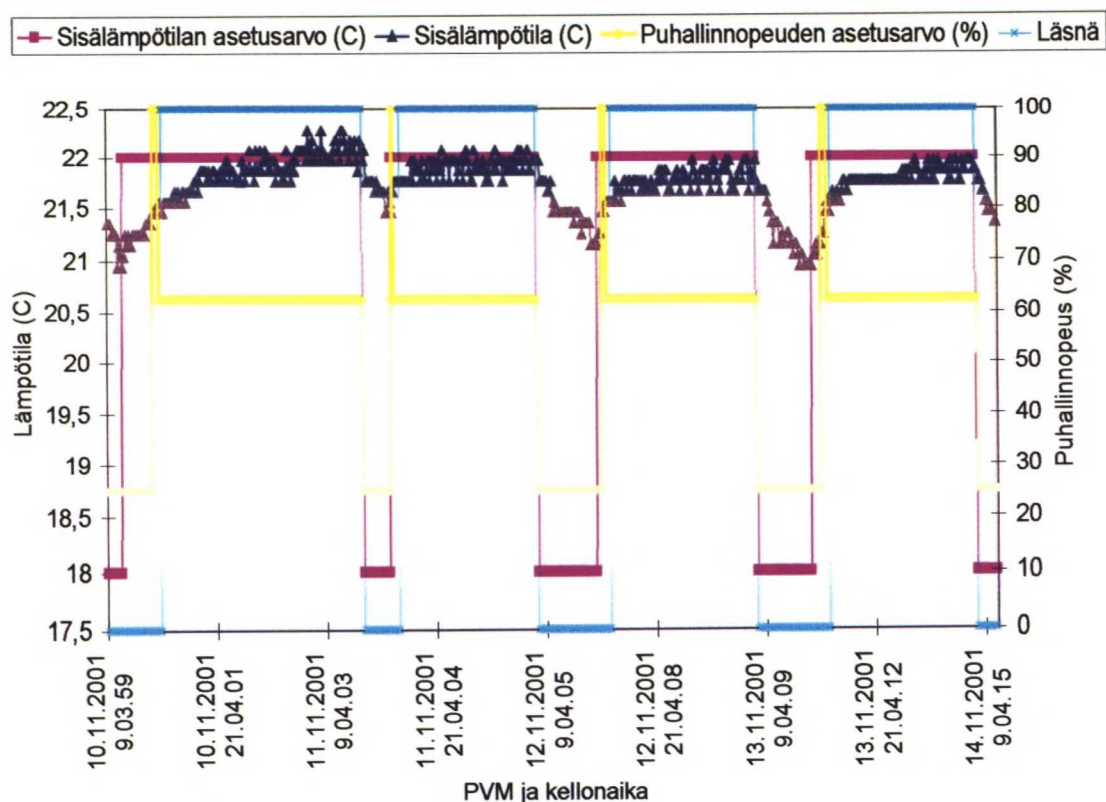
Kuva 33 esittää METOP-talon testiajoja jaksolla 29.10.-7.11.2001. Jakson perusteella on laskettu luvussa 8 esitettävät energiankulutuslaskelmat.



Kuva 33: METOP-talon testitulokset 29.10.-7.11.2001.

Kuvasta 33 nähdään hyvin se, että palautuslämmitys aloitetaan eri päivinä eri aikaan. Jos sisälämpötila laskee säästöjaksolla paljon eli ulkolämpötila on matala, palautuslämmitys aktivoidaan aikaisemmin. Jos sisälämpötila ei laske nopeasti, voidaan säästöjaksoa jatkaa pidempään. Kaikkina päivinä sisälämpötila on kuitenkin noussut juuri algoritmin ”oppimisrajan” tarkkuudella normaalitasolle, kun asukas saapuu rakennukseen.

Kuvassa 34 tarkastellaan testituloksia jaksolla 10.-14.11.2001, jolloin viimeistään algoritmin tulisi kyetä hallitsemaan rakennuksen dynamiikka riittävällä tarkkuudella. Nähdään, että sisälämpötila laskee noin yhden asteen jokaisella säästöjaksolla. Lämpötilan palauttaminen normaaliksi onnistuu jokaisella kerralla ennen käyttäjän saapumista rakennukseen valitulla tarkkuudella (0,5 °C). Nähdään myös, että lämpötila palautuu normaalitasolle juuri sopivasti, ei liian myöhään eikä myöskään liian aikaisin. Puhallinnopeuden asetusarvo nousee ennen käyttäjän saapumista huippuunsa tarvittavaksi ajaksi, jolloin lämmitystä ja ilmanvaihtoa tehostetaan. Ulkolämpötilan keskiarvo jakson aikana on +4,6 °C.

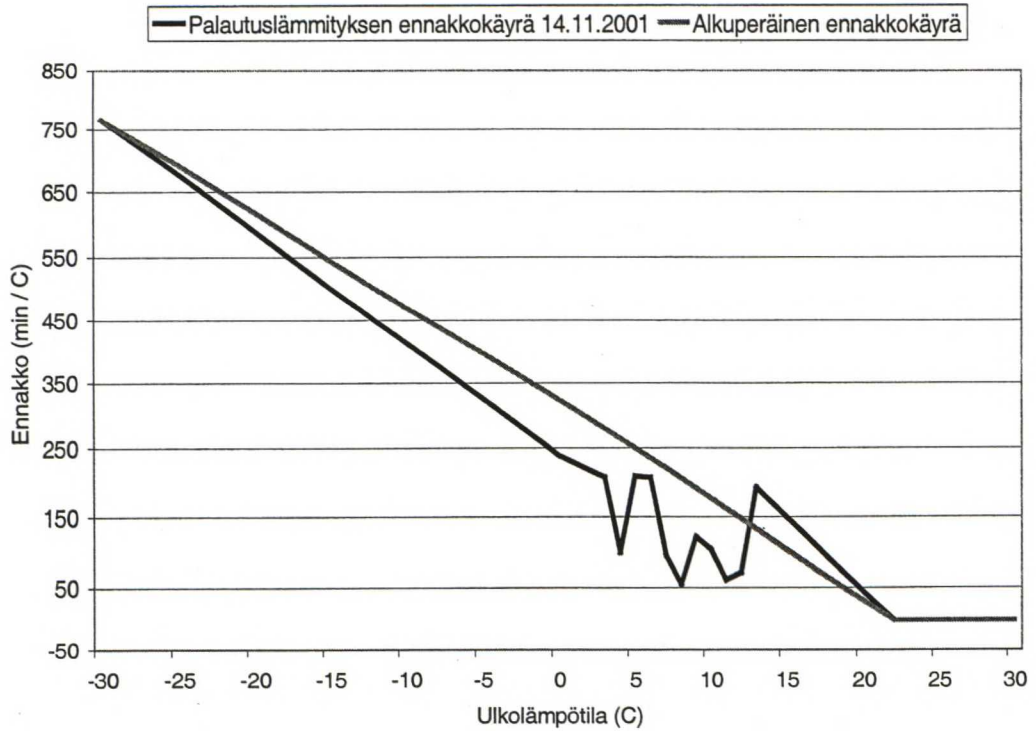


Kuva 34: Testitulokset 10.-14.11.2001.

### 7.3.3 Ennakkokäyrän muuttuminen

Palautuslämmityksen ennakkokäyrä on muuttunut testausjakson aikana useasta kohdasta, lähinnä ulkolämpötila-alueella 0 – +15 °C. Kuva 35 esittää 14.11.2001 mennessä tapahtuneita muutoksia ennakkokäyrällä. Käyrän epämääräiseltä näyttävä muoto selittyy muuttuvilla olosuhteilla, sillä eri palautuslämmitysjaksojen aikana ulkolämpötila saattaa joko nousta tai laskea. Tästä johtuen johonkin palautuslämmitykseen saattaa kulua merkittävästi vähemmän aikaa kuin toiseen, vaikka ulkolämpötila olisi lähes sama molempien palautuslämmitysten alkaessa. Myös ilmankosteus ja muut ulkoiset, dynaamiset tekijät vaikuttavat palautuslämmitysaikoihin. Vaikka käyrä ei näytä ”kauniilta”, suuruusluokat ovat kuitenkin oikeita, mikä riittää algoritmin toimimiseksi oikein kuten esimerkiksi kuvan 34 tulokset osoittavat.

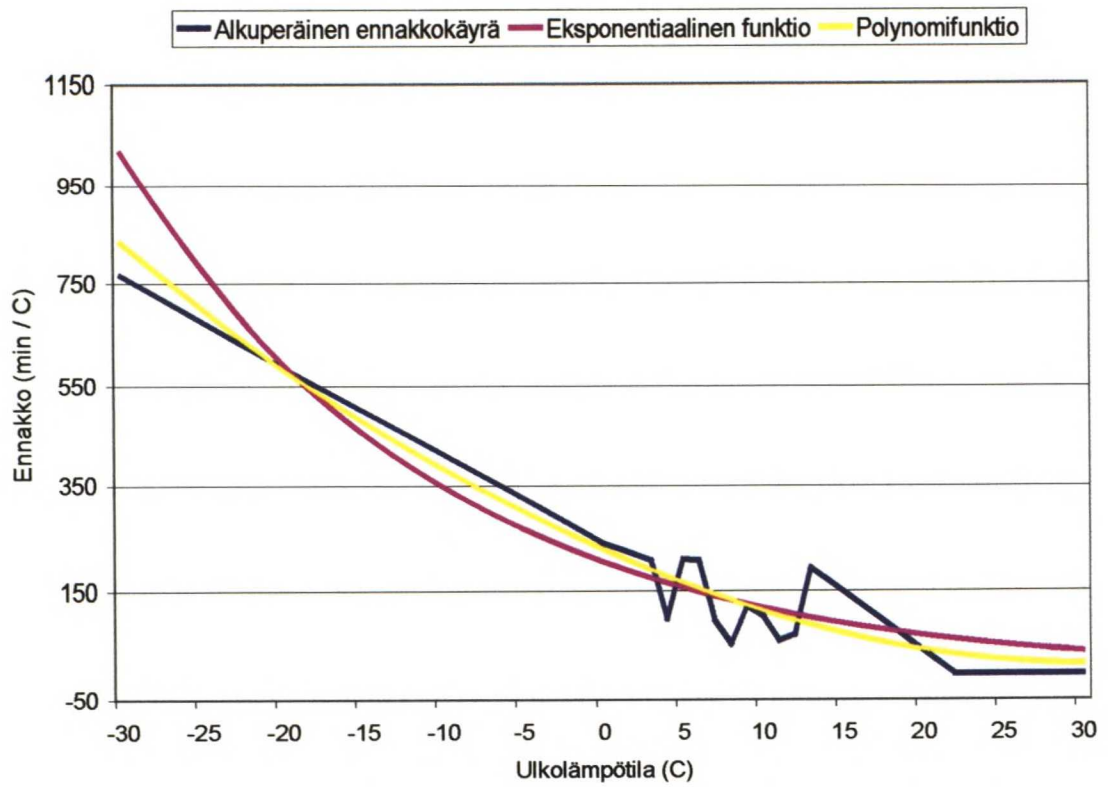




Kuva 35: Ennakkokäyrän muuttuminen METOP-matalaenergiatalossa 1.10.-14.11.2001.

Jos ennakkokäyrän tarkkuutta halutaan parantaa ja virheherkkyyttä pienentää, algoritmiin voidaan liittää painotetun pienimmän neliösumman menetelmällä toimiva käyrän muokkaus. Tämä ominaisuus toteutettiin algoritmiin, mutta sen testaamista METOP-talossa ei tehty, joten tuloksia ei esitetä tässä. Jotta paremmin selviäisi mistä on kyse, kuva 36 esittää edellä käsiteltyä ennakkokäyrää PPNS-menetelmällä muokattuna kahdella eri käyrämuodolla.

Kuvan 36 kaksi eri käyrää on saatu eri sovitussuhteilla ja painokertoimilla alkuperäisistä ennakkokäyrän pisteistä. Oleellista PPNS-menetelmän käytössä on sopivan käyrämuodon (mallin) löytäminen.



Kuva 36: PPNS-menetelmällä muokatut ennakkokäyrät.

Kuvan 36 eksponentiaalisella funktiolla ennakkokäyrän pisteet on sovitettu käyrälle  $y = f(x) = k_0 e^{k_1 x}$ , jossa  $k_0$  ja  $k_1$  ovat sovitettavat parametrit ja  $e^x$  eksponenttifunktio. Sovitettava polynomifunktio on puolestaan  $y = f(x) = k_0 + k_1 x + k_2 x^2$ , jossa  $k_0$ ,  $k_1$  ja  $k_2$  ovat sovitettavat parametrit. Ennakkokäyrän pisteitä painotetaan enemmän kustannusfunktioita laskettaessa, mikäli pisteiden kohdalla on joskus tapahtunut oppimista. Jos oppimista ei ole tapahtunut pistettä vastaavalla ulkolämpötilan arvolla, pisteen paino on pienempi.

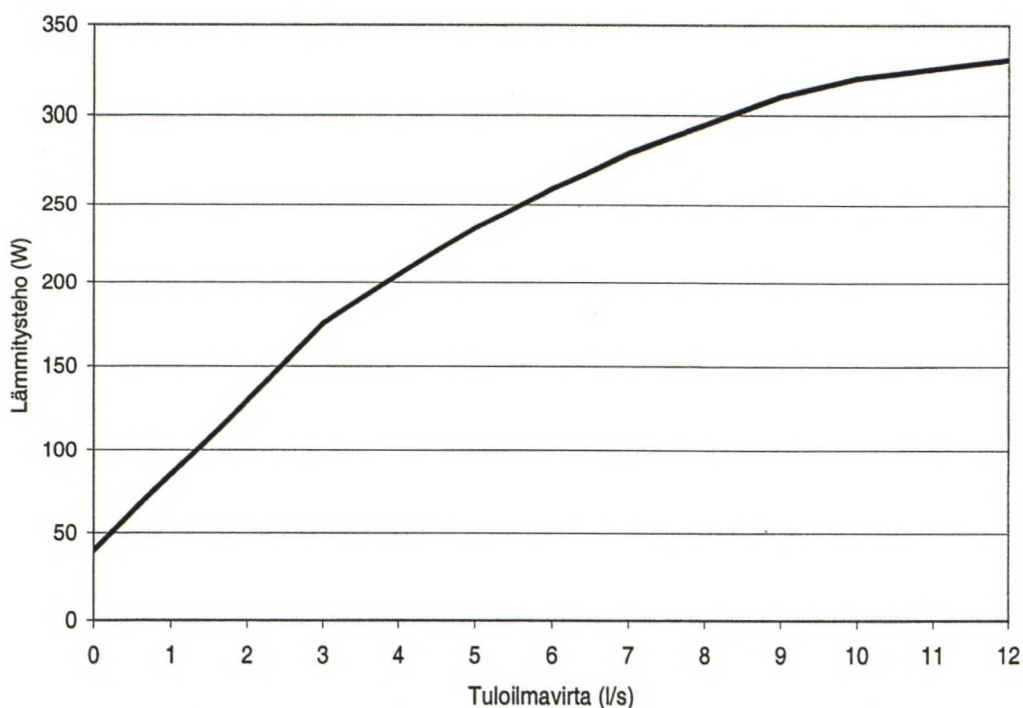
Eksponentiaalisen käyrämuodon etuna on sen soveltuminen lämmitystapahtuman kuvaamiseen. Lämmitysaika kasvaa eksponentiaalisesti ulkolämpötilan laskiessa lineaarisesti (sisäilman dynamiikkayhtälön perusteella). Eksponentiaalinen käyrämuoto on jäykkä muutoksille, joten se saattaa olla hidas muuttumaan. Polynomifunktion etu on oppimisen nopeus, mutta vaarana on liiallinen herkkyyys esimerkiksi virhetilanteissa. Käyrän muoto saattaa muuttua helpommin ”vääränlaiseksi”, koska polynomifunktioon sisältyy toisen asteen termi. Menetelmän soveltaminen käytäntöön vaatisi simulointeja, jotta sopivat painotukset löydetäisiin.

## 8 Energiankulutuksen laskelmat

Tässä luvussa käsitellään energiankulutuksen kannalta METOP-talon testausta. Energiankulutusta arvioidaan ajanjakson 29.10. – 7.11.2001 mittausdatasta. Jaksolla kulunut lämmitysteho voidaan laskea mittausten perusteella. Matlabin Simulinkillä simuloidaan rakennuksen mallia, jonka heräte on lämmitysteho ja vaste sisälämpötila. Mallin perusteella identifioidaan parametrit, jotka parhaiten selittävät sisälämpötilan muutokset lämpöenergian muutosten perusteella. Lisäksi energiankulutusta verrataan mallin pohjalta tilanteeseen, jossa algoritmia ei käytettäisi.

### 8.1 Energiankulutuksen arviointi Metop-talon kokeiden tuloksista

Energiankulutus lasketaan testiajojen lokitiedostoista tässä kuvatulla tavalla. Ensinnäkin on huomioitava lämmitysjärjestelmän ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatterin teho, joka saadaan, kun ilmanvaihtokoneen maksimilämmitystehoa (1000 W) kerrotaan koneen lämmityksenohjausprosentilla. Saadaan se teho, jolla ilmanvaihtokone lämmittää tuloilmaa. Tähän arvoon lisätään huonekohtaisten lämmityselementtien teho, joka riippuu ilmavirrasta ja tuloilman lämpötilasta (Pietarinen ja Saari 1999). Tuloilmaelementit huoneissa rajoittavat itse lämmitystehoaan ilmavirran pienentyessä. Jokaisessa toimistohuoneessa on kaksi tuloilmaelementtiä, eteisessä yksi. Tuloilmaelementin maksimiteho suurimmalla ilmanvaihtokoneen nopeudella on noin 330 W. Näin ollen neljän tarkkailtavan huoneen ja eteisen maksimilämmitystehoksi saadaan  $4 \cdot 2 \cdot 330 \text{ W} + 1 \cdot 330 \text{ W} + 1000 \text{ W} = 3970 \text{ W}$ . Tämä maksimiteho edellyttää ilmanvaihtokoneelta suurinta ilmavirtaa sekä sitä, että tuloilmaelementeille tulevan ilman lämpötila on  $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuva 37 esittää yksittäisen lämmityselementin tehon riippuvuutta tuloilmavirrasta.



*Kuva 37: Lämmityselementin teho tuloilmavirran funktiona.*

Maksimiteho kasvaa entisestään mikäli elementille tulevan ilman lämpötila laskee. Jos huoneiden tuloilman lämpötila on  $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lämmittimien teho kasvaa noin 10 % verrattuna tilanteeseen, jossa tuloilman lämpötila on  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Testauksen aikana elementeille tulevan ilman lämpötila vaihteli  $+14 - +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :een välillä, ja energialaskelmissa on oletettu elementtien lämmitystehon ja niille tulevan ilman lämpötilan välinen riippuvuus lineaariseksi.

Ilmavirran määrä lämmityselementtien läpi eri huoneissa vaihtelee hieman. Taulukosta 13 nähdään toimistohuoneisiin tulevat ilmavirrat, kun ilmanvaihtokoneen ilmavirta on maksimissaan ( $116\text{ dm}^3/\text{s} = 116\text{ l/s}$ ).



*Taulukko 13: Ilmavirrat eri huoneiden lämmityselementtien läpi.*

<b>Tila</b>	<b>Tuloilmavirta l / s / elementti</b>
Toimistohuone 21	9
Toimistohuone 23	9,5
Toimistohuone 24	10
Toimistohuone 25	9,5
Eteinen	10

Taulukossa 13 ei ole huomioitu toimistohuonetta 22, koska se ei kuulu tarkastelun piiriin. Huonetta 22 ei ole kytketty rakennusautomaatiojärjestelmään eikä sitä siten voida ohjata valvomosta. Taulukkoon 14 on laskettu huoneittain elementtien lämmitystekot testauksessa käytetyillä ilmanvaihtokoneen puhallinnopeuksilla.

*Taulukko 14: Lämmityselementtien tehot huoneittain ilmanvaihtokoneen eri puhallinnopeuksilla (säätöasento).*

<b>Lämmitysteho W / huone</b>	<b>Säätöasento</b>		
<b>Tila</b>	2	5	8
Toimistohuone 21	310	460	570
Toimistohuone 23	330	490	600
Toimistohuone 24	340	510	630
Toimistohuone 25	330	490	600
Eteinen	170	260	310

Ilmanvaihtokoneen ilmavirran säätöasennot vastaavat kokonaisilmavirtoja taulukon 15 mukaisesti. Samaan taulukkoon on merkitty myös ilmanvaihtokoneen puhallinmoottoreiden (tulo- ja poistokoneet) ottotehot eri puhallinnopeuden asetuksilla (<http://www.vallox.fi/>). Huoneiden lämmityselementtien käyttöaste on tallennettu testausjakson aikana, joten kokonaislämmitysenergia voidaan laskea edellisten perusteella.

Taulukko 15: Ilmanvaihtokoneen ilmavirrat säätöasentojen mukaan.

Säätöasento	Kokonaisilmavirta (l / s)	Puhallinmoottorin teho (W)
2 (säästöpuhallus)	35	60
5 (normaalipuhallus)	75	160
8 (tehostuspuhallus)	116	305

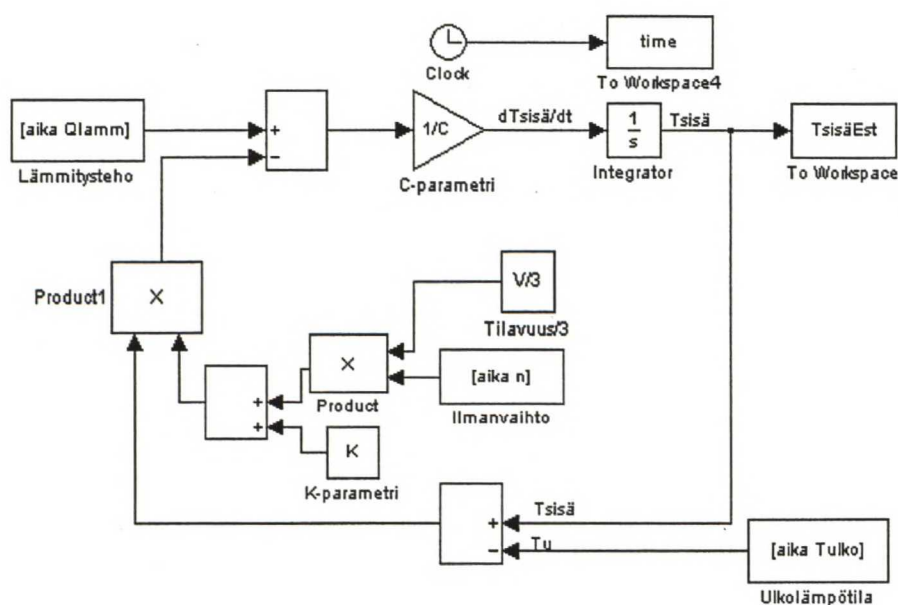
## 8.2 Rakennuksen mallin simulointi

Edellä kuvatulla menetelmällä voidaan laskea testiajojen aikana käytetty lämmitysteho. Jotta algoritmin toiminnan hyvyttä voidaan arvioida, pitää testiajojen aikana tallennettujen mittausten perusteella identifioida rakennuksen mallin parametrit. Mallia voidaan käyttää vertailtaessa lämpöenergiankulutusta algoritmin ohjaaman ja vakiolämpöisen rakennuksen välillä samoilla parametreilla. Koska olosuhteet vaihtelevat testausjaksojen aikana, vertailua ei voida tehdä testikohteessa (ainakaan nopeasti). Mallin avulla voidaan simuloida rakennuksen sisälämpötilan käyttäytymistä ja lämpöenergian kulutusta eri asetusarvoilla. Tavallisesti energiankulutuksen vertailu tehdään kahdella pitkällä, esimerkiksi vuoden mittaisella jaksolla todellisissa olosuhteissa.

Rakennuksen sisäilman lämpötilan dynamiikkaa kuvaa kaava (4). Koska rakennuksen sisäpintojen lämpötiloja ei ole käytettävissä, voidaan yhtälö kirjoittaa yksinkertaisempaan muotoon, jossa rakenteiden läpi virtaavan lämmön määrän oletetaan riippuvan sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksesta sekä rakenteiden k-arvoista. Lisäksi parametrisoidaan pintojen alat  $A_i$  ja k-arvot  $k_i$  yhdellä parametrilla  $K$ . Sisäisiä lämpökuormia ei ollut rakennuksessa testijaksojen aikana. Näin yhtälö saa muodon:

$$\frac{dT_{SISÄ}}{dt} = \frac{1}{C} \left[ Q_{LÄMM} - \left( K + \frac{nV}{3} \right) (T_{SISÄ} - T_U) \right]. \quad (26)$$

Yhtälön perusteella voidaan luoda Matlabin Simulink-ympäristössä kuvan 38 mukainen simulointimalli.



Kuva 38: Rakennuksen Simulink-malli.

Käsittelyssä oleva mittausdata on Metop-talosta ajalta 29.10. - 7.11.2001. Mittaukset on tehty 10 minuutin välein ja herätteenä mallissa oleva lämmitysteho ( $Q_{\text{lämm}}$ ) on laskettu aiemmin kuvatulla tavalla. Jakson kokonaisenergiankulutus on 258,4 kWh. On huomattava, että kokonaislämmitysteho on laskettu pelkästään kuluneen sähkötehon perusteella eikä lämmöntalteenoton varastoimaa lämpöenergiaa huomioida, vaikka sen osuus on merkittävä. Lämmöntalteenoton tuottaman energian voidaan olettaa riippuvan lineaarisesti sisä- ja ulkolämpötilojen erotuksesta, joten mallissa lämmöntalteenotto kuvautuu parametrille K.

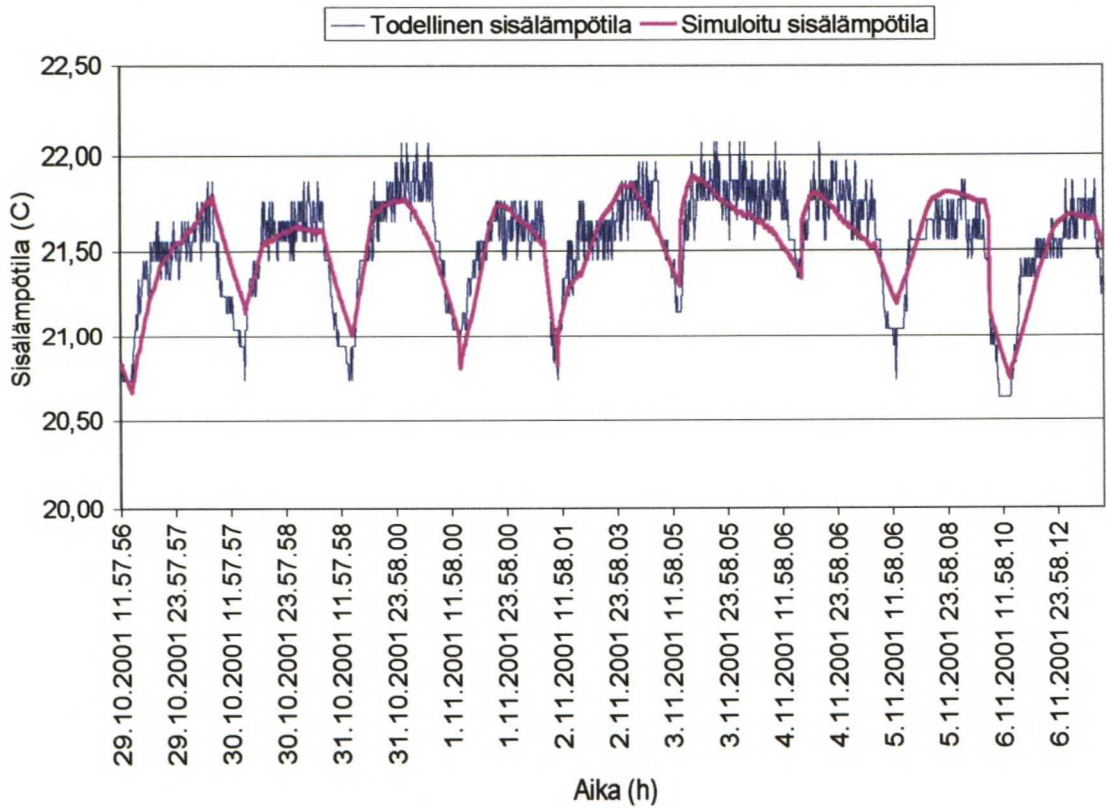
Mittausdata on jaettu kuuteen osaan, jotta mallin estimoitu sisälämpötila vastaisi paremmin todellista sisälämpötilaa. Parametrit ovat aikavariantteja eikä niiden voida olettaa pysyvän vakiona noin viikon mittaisella jaksolla. Mallin parametrit etsitään Matlabin "fminsearch(...)"-funktioilla, joka kokeilee eri parametriarvoja ja simuloi mallia niillä, kunnes löytää parhaiten vertailudatan selittävät parametrit.

Taulukkoon 16 on kerätty tarkastelujaksoittain rakennuksen mallin parametrit.

Taulukko 16: Rakennuksen mallin K- ja C-parametrit tarkastelujaksoittain.

Jakso (pvm/klo)	K [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ]	C [ $\text{kJK}^{-1}$ ]
1 (29.10./11:57 – 1.11./13:38)	15,3	25717
2 (1.11./13:48 – 2.11./10:58)	28,1	15621
3 (2.11./11:08 – 3.11./13:38)	10,5	25049
4 (3.11./13:48 – 4.11./16:08)	5,2	38361
5 (4.11./16:18 – 6.11./8:58)	12,1	40487
6 (6.11./9:08 – 7.11./9:58)	9,8	31748

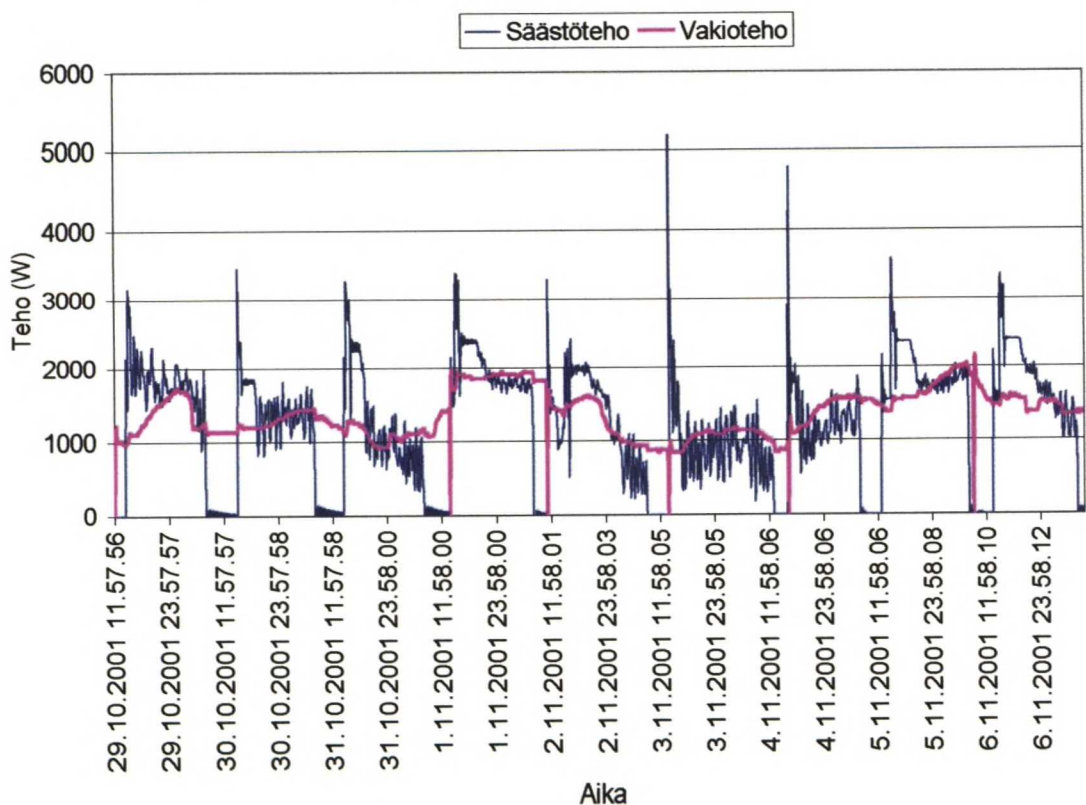
Rakennuksen parametrit kiinnitetään tarkastelujaksoittain. Kuva 39 esittää mitattua ja mallin estimoimaa sisälämpötilaa koko tarkastelujaksolla (kaikki kuusi jaksoa peräkkäin).



Kuva 39: Simulink-mallin ennustama ja mitattu sisälämpötila.



Simulointimallin perusteella voidaan arvioida kuinka paljon energiaa säästetään rakennuksen energiankulutuksessa käyttämällä lämpötilan pudotusta käyttäjien poissaolojaksojen aikana. Rakennuksen Simulink-malliin liitetään PID-säädin, jolla lämpötila rakennuksessa pidetään halutulla tasolla. Energiankulutusta arvioitaessa tarkkaillaan säätimen ulostuloa eli säätösuuretta, joka on samalla rakennuksen mallin heräte (lämmitysteho). Säätimen parametrit identifioidaan siten, että mallin ulostulon eli sisälämpötilan ja mitatun sisälämpötilan ero on mahdollisimman pieni (käytetään `fminsearch(...)`-funktioita). Kun sopivat parametrit löytyvät, säätimen ulostulo vastaa tarkasti mitattua lämmitystehoa. Jotta vertailu vakio­lämpötilaiseen tapaukseen olisi mahdollista, mallia simuloidaan samalla säätimellä ja samoilla rakennuksen parametreilla siten, että tavoitelämpötila on vakio (normaalilämpötila). Hetkittäistä lämmitystehoa molemmissa tapauksissa esittää kuva 40.



Kuva 40: Energiankulutuksen vertailu simuloidun rakennuksen mallin perusteella.

Kuvan 40 ”säästöteho”-käyrä esittää lämmitystehoa testiajojen aikana ja ”vakioiteho”-käyrä rakennuksen mallin simuloinnin perusteella saatua tehoa, joka tarvitaan lämpötilan pitämiseen vakioarvossa (22 °C). Energiankulutus (teho / aika) on laskettu molemmissa tapauksissa taulukkoon 17.

*Taulukko 17: Energiankulutusvertailu testijakson 29.10.-6.11.2001 aikana.*

	Säästöjakso	Vakiojakso
<b>Energiankulutus [kWh]</b>	258,4	290,1

Mittausten perusteella laskettu energiankulutus jakson aikana oli 258,4 kWh. Sisälämpötilan laskulla METOP-talossa saavutetaan 29.10. - 7.11.2001 välisenä aikana 11 %:n säästö energiankulutuksessa. Voidaan siis arvioida, että METOP-talossa säästetään tarkasteluviikon aikana noin 32 kWh lämmitysenergiassa. Lisäksi ilmanvaihtokoneen puhaltimen moottorin energiankulutus oli 13,0 % (4,5 kWh) pienempi kuin vakionopeudella. Testijakson aikana viihtyvyys rakennuksessa ei huonontunut asukkaan läsnäollessa.

Nähdään, että TRNSYS-simuloinneilla saavutetut energiankulutuksen säästöt (noin 20 %) eivät toteudu METOP-talossa. Tämä johtuu siitä, että METOP-talo on erittäin tiivis, joten sisälämpötila ei laske kovin nopeasti säästöjakson aikana. Toisaalta myös ulkolämpötila oli korkeampi METOP-talon testauksen aikana (keskiarvo +6,5 °C) kuin TRNSYS-simuloinneissa, joten säästö jää tästäkin syystä pienemmäksi. Kylmemmillä ilmoilla ja huonommin eristetyssä (tavallisemmassa) rakennuksessa päästään suurempiin säästöihin. Huomioitavaa on myös METOP-taloa ja TRNSYS-simulointeja vertailtaessa, että ilmavirrat ovat erilaiset. METOP-talossa ilmanvaihtokone on rakennuksen kokoon nähden suuri, kun puolestaan TRNSYSissä ilmavirrat vastaavat paremmin Suomen rakennuskannassa käytettyjä ilmavirtoja.

## 9 Lopputulokset

Tässä työssä esitelty oppiva algoritmi rakennuksen sisälämpötilan ja ilmavirtojen ohjaukseen soveltuu käytettäväksi erilaisissa rakennuksissa. Rajoituksena kerrostalojen kohdalla on suuri käyttöaste ja pienet mahdollisuudet säätää yksittäistä huoneistoa. Algoritmi soveltuukin paremmin omakoti-, pari- ja rivitaloihin tai toimistorakennuksiin. Näissä algoritmeilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä energiankulutuksessa. Algoritmi vaatii toimiakseen tietokoneohjatun lämmitysjärjestelmän, mikä saattaa rajoittaa sovelluskohteiden lukumäärää.

VTT:n TRNSYS-ohjelmistolla tehtyjen simulointien perusteella algoritmeilla voidaan saavuttaa muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä 21 %:n säästöt lämpöenergiassa ja 23 %:n säästöt puhaltimen sähköenergiassa sekä vakioilmavirtaisessa tapauksessa 12 %:n säästöt lämpöenergiassa tyypillisellä talvijaksolla. Kesällä säästöt jäävät pienemmiksi, koska rakennusten sisälämpötila laskee hitaammin eikä lämmitysenergiaa kulu muutenkaan kovin paljoa. Viihtyvyys ei heikkene rakennuksessa algoritmin käytön aikana, mikäli rakennuksen käyttö on kohtuullisen säännöllistä.

Työssä esiteltiin kaksi eri versiota algoritmista. Toinen on tarkoitettu vakioilmavirtaisiin- ja toinen muuttuvailmavirtaisiin järjestelmiin. Tuloksista nähdään, että etenkin ilmalämmitteisissä rakennuksissa ilmavirran säädöllä on merkittävä vaikutus energiankulutukseen. Siksi on järkevää käyttää muuttuvailmavirtaiseen järjestelmään kehitettyä algoritmia aina kun mahdollista.

Vakioilmavirtaista järjestelmää ohjaava algoritmi on ohjelmoitu sekä Fortran- että Visual Basic-ohjelmointikielillä. Muuttuvailmavirtaiseen järjestelmään kehitetty algoritmi on ohjelmoitu Fortranin lisäksi Java-kielellä. METOP-talon kokeita varten Excel-pohjaiseen käyttöliittymään tehtiin muutoksia ja lisäfunktioita. Fortran-kielinen versio käännettiin DLL-tiedostoksi METOP-käyttöä varten.



Toimistorakennusten kohdalla jäähdytys on myös yleistä suurista lämpökuormista johtuen, vaikka ulkolämpötila olisi merkittävästi sisälämpötilaa matalampi. Tästä syystä algoritmin Java-kieliseen versioon on liitetty myös jäähdytystä ohjaava toiminto. Mikäli rakennusta jäähdytetään, käytetään ns. jäähdytyksen ennakkokäyrää. Tällä ominaisuudella täydennettynä algoritmia voidaan soveltaa suuressa toimistokohteessa esimerkiksi COBA-arkkitehtuuriin perustuvalla alustalla. Tarkempi kuvaus algoritmin toiminnasta COBA-ympäristössä Lintulahdenkuja 6:n toimistorakennuksessa on liitteessä 1.

Työssä käsiteltiin Suomen rakennuskantaa ja arvioitiin muun muassa rakennusten käyttöasteita. Todettiin, että rakennuskannassa piilee suuri energiansäästöpotentiaali, koska rakennuksia lämmitetään paljon myös niiden aktiivisen käytön ulkopuolella. Mikäli rakennuksen käyttö on jokseenkin säännöllistä, voidaan älykkäällä lämpötilan ja ilmavirtojen ohjauksella saavuttaa merkittäviä säästöjä.



## 10 Johtopäätökset

Tässä työssä on esitelty rakennuksen ilmapirtaa ja sisäilman lämpötilaa ohjaava algoritmi. Se kehitettiin RUSE-projektissa (Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut) yhteistyössä VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikan sekä Teknillisen korkeakoulun systeemitekniikan laboratorion kanssa. RUSE-projekti päättyi vuoden 2002 alussa.

Algoritmin toiminta perustuu rakennuksen käyttöasteen seurantaan. Lämpötilan ja ilmapirran asetusarvoja lasketaan, kun rakennuksessa ei ole kukaan. Olosuhteet palautetaan normaaleiksi ennen käyttäjän saapumista. Algoritmin toiminnan edellytyksenä on, että rakennuksen lämmitysjärjestelmä on tietokoneohjattava ja että rakennuksen käytöstä saadaan esimerkiksi läsnäoloantureilla varmaa tietoa.

Työssä käsiteltiin aluksi Suomen rakennuskantaa yleisesti ja tutkittiin eri lämmitysjärjestelmiä. Näiden perusteella arvioitiin yleisesti energiankulutuksessa piileviä säästämahdollisuuksia. Todettiin, että energiaa säästävien menetelmien kehittäminen on tarpeen. Työssä tarkasteltiin myös rakennuksen ja sen rakenteiden dynamiikkaa, joiden perusteella arvioitiin METOP-koetalon testausjakson aikana saavutettuja energiankulutuksen säästöjä. Rakennusautomaatiojärjestelmistä esiteltiin peruskäsitteet ja toiminnan periaatteet. Katsaus tulevaisuuteen luotiin COBA-arkkitehtuurin esittelyn yhteydessä. COBA luo avoimuudellaan erinomaisen pohjan erilaisten rakennuksen toimintaa ohjaavien algoritmien laajemmallekin levitykselle ja hyödyntämiselle.

Läsnäolon tunnistamista rakennuksessa käsiteltiin luvussa 5. Osoittautuu, että läsnäolotiedon oikeellisuus on erittäin kriittinen tekijä erilaisten älykkäiden ja etenkin oppivien algoritmien sovelluksissa. Väärä läsnäolotieto voi johtaa siihen, että kaikki vuosien varrella opittu tieto menettää merkityksensä, ja yksittäisellä virheellisellä mittauksella voi olla kauaskantoiset vaikutukset.

Algoritmistä esiteltiin kaksi eri versiota vakio- ja muuttuvailmavirtaisiin järjestelmiin. Molempien algoritmien osalta esitettiin algoritmin rakenne ja ominaisuudet, TRNSYS-simuloinnit sekä METOP-matalaenergiatoimistotalossa suoritettujen testauksien tulokset. Simulointien perusteella algoritmilla voidaan saavuttaa jopa yli 20 %:n säästöt lämpöenergiassa ja ilmanvaihtojärjestelmän puhallinmoottorin sähköenergiassa. METOP-talon tiiviyn ja muutenkin tehokkaan energian kierrättämisen ja kulutuksen minimoimiseksi säästöt koekohteessa jäivät hieman pienemmiksi. Lisäksi energiansäästön suuruus riippuu selvästi ulkolämpötilasta. Lämpimillä ilmoilla ei säästöjä saavuteta, koska rakennuksia ei tarvitse juurikaan lämmittää. Mitä kylmempi ilma on, sitä suurempi mahdollisuus on myös säästää.

Algoritmin oikean toiminnan ja oppivien ominaisuuksien tehokkuuden kannalta on tärkeää, että rakennusautomaatiojärjestelmä tai muu vastaava alusta, jonka päällä algoritmi toimii, on kunnossa ja toimii hyvin. METOP-talon testauksen yhteydessä kävi ilmi, että jos esimerkiksi kenttäväylään tulee virhetilanne, mittaukset voivat jäädä näyttämään viimeisintä arvoa jatkuvasti. Tällöin algoritmin oppimiseen tulee virhe, koska algoritmi saa virheellistä mittaustietoa järjestelmästä. Toisaalta lämmitysjärjestelmän asetusten tulee olla kohdallaan algoritmin käytön aikana. Esimerkiksi METOP-talossa huomattiin, että järjestelmä ei aluksi pystynyt toteuttamaan annettuja asetusarvoja lämpötilalle. Kaikkien huoneiden lämpötilat jäivät alle asetusten. Lämmitysjärjestelmän virheet haittaavat algoritmin oppimista.

Älykäs rakennus tai yksittäinen sovellus ei saa vaatia käyttäjältä lisätoimenpiteitä. Älykkyyden tulee tuoda energiansäästöjä tai lisätä viihtyisyyttä energiankulutuksen kasvamatta. Käyttäjän tulee voida toimia kuten ennenkin, mutta hänen tulee myös voida kontrolloida älysovellusta. Toisin sanoen, jos jokin menee pieleen ja sovelluksen äly pettää, käyttäjä kytkee sovelluksen pois toiminnasta. Kaikissa järjestelmissä tulisi painottaa käyttäjälähtöistä lähestymistä ja ottaa huomioon, että järjestelmiä tehdään käyttäjiä eikä tekniikkaa varten.

Oppivan algoritmin jatkokehityksessä tulisi huomioida paremmin rakennusautomaatiojärjestelmien mahdolliset virhetilanteet. Algoritmin tulisi jotenkin pystyä havaitsemaan järjestelmän virhetilat. Toisaalta algoritmiin voisi liittää moduulin, joka tarkkailee energiankulutusta rakennuksessa. Siten käyttäjälle voitaisiin esittää energiankulutuksen säästöt prosentteina tai euroina. Algoritmin soveltuvuutta rakennuksiin voitaisiin parantaa liittämällä algoritmiin palautuslämmityksen ennakkokäyrän alustustoiminto, jossa algoritmi mallintaisi rakennusta ensimmäisten toimintapäivien aikana. Tämän perusteella algoritmi voisi muodostaa itse ennakkokäyrän. Näin päästäisiin eroon alkuarvoista, jotka pitää antaa ennen algoritmin käyttöönottoa.

Algoritmi toimisi paremmin, mikäli rakennuksen lämmitysjärjestelmän säätimet olisi viritetty nopeiksi ja erityisesti rakennuskohtaisesti. Tyypillisesti rakennusten lämmitysjärjestelmissä käytettävät PI- tai PID-säätimet on viritetty jo valmistettaessa niin hitaiksi, että stabiilisuus säilyy varmasti sovelluskohteesta riippumatta. Koska algoritmin kohdalla käytetään hyväksi mahdollisimman pitkää lämmityksen säästöjaksoa, olisi nopeasta lämpötilan säädöstä etua. Tällöin palautuslämmitys aktivoitaisiin mahdollisimman myöhään, jolloin energiansäästöjakso olisi pisimmillään ja säästöt suurimmillaan.



## Lähdeluettelo

Björkholtz, Dick. 1987. Lämpö ja kosteus: Rakennusfysiikka. Rakentajain kustannus Oy, Vammala 1987.

Forsman, Jukka; Happonen, Veijo; Kaleva, Kari; Kari, Ilkka J.; Koivisto, Pekka; Koskenranta, Tuomas; Mutttilainen, Juha; Mäki, Heikki; Nummelin, Börje; Nurminen, Markku; Sahala, Antti; Sahlstén, Toivo; Saikkonen, Pekka; Sarkkinen, Juha; Virkki, Marko. 1998. Avoimet rakennusautomaatiojärjestelmät. Sähkötieto ry, Espoo 1998.

Gruber, Peter; Gwerder, Markus; Tödtli, Jurg. 2001. Predictive Control for Heating Applications. 7<sup>th</sup> Rehva World Congress, Clima 2000, Napoli 2001.

Johansson, Rolf. 1993. System modeling & identification. Prentice Hall information and system sciences series. Prentice-Hall Inc., New Jersey 1993.

Kaartinen, Jani. 2000. Älykäs sisälämpötilan säädin, toiminnallinen kuvaus. RUSE-projektin työraportti 20.12.2000, Teknillinen korkeakoulu, systeemitekniikan laboratorio, Espoo 2000.

Karjalainen, Sami. 2001a. Läsnaolon tunnistaminen asuinrakennuksissa. RUSE-projektin työraportti 21.8.2001, VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2001.

Karjalainen, Sami. 2001b. Älykäs sisälämpötilan säädin: jatkokehitys ja simuloinnit. RUSE-projektin työraportti 23.5.2001, VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2001.

Karjalainen, Sami. 2000. Rakennusten säätöjärjestelmät ja käyttäjä. RUSE-projektin työraportti 5.10.2000, VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo 2000.

Kaukonen, Vesa. 1987. Koerakennuksen lämpötase ja -dynamiikka. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, konetekniikan osasto, lämpötekniikka, Tampere 1987.



Kauppalehti 19.11.2001. Kauppalehti Extra – Informaatiotekniikka s. 31, Älykoti ei saa pakottaa aktiiviseksi. Helsinki 2001.

Koskenranta, Tuomas. 2001. COBA in nutshell – Brief introduction, esittelykalvot. TALTEK-messut 21. - 22.11.2001, Helsinki 2001.

Kuntze, H.-B. ja Bernard, Th. 1998. A New Fuzzy-based Supervisory Control Concept for the Demand-responsive Optimization of HVAC Control Systems. Proceedings of the 37<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision & Control. Tampa, Florida, USA 1998.

Lassila, K. (toim.). 1992. LVIS-2000 tyyppirakennukset. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Espoo 1992.

Lauckner, Gunter; Kunze, Jörn; Klingner, Matthias; Riedel, Manfred; Bentscheff, Sabine; Heinz, Ehrenfried; Markfort, Dirk. 2001. Development and Field Test of a Demand Guided Coordination of Heating and Ventilation Control Systems in Reconstructed Blocks of Flats. 7<sup>th</sup> Rehva World Congress, Clima 2000, Napoli 2001.

Lepach, Thomas; Marttila, Esa ja Hammo, Simo. 1997. Practical model for economic optimization of a heat recovery plate heat exchanger and its examination. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto, Lappeenranta 1997.

Pakanen, Jouko. 1998. Rakennusten tiedonsiirtoteknologiat – Lähivuosien kehitysnäkymiä. VTT tiedotteita 1932. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo 1998.

Pakanen, Jouko. 1994. Conduction of heat through slabs and walls – A differential-difference approach for design, energy analysis and building automation applications. VTT Publications 162. VTT, Technical research centre of Finland, Espoo 1994.

Pietarinen, Petri ja Saari, Mikko. 1999. Ilmanvaihtolämmityksen hajautettu automaatio matalaenergiatalossa. VTT tiedotteita 1950. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo 1999.

Roaf, Susan ja Hancock, Mary (toim.). 1992. Energy efficient building – A design guide. Blackwell Scientific Publications, Iso-Britannia, 1992.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. Osa D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet. Helsinki: Ympäristöministeriö, 1987.

Tilastokeskus. 1999. Rakentaminen ja asuminen, Vuosikirja 1999. Tummavuoren Kirjapaino Oy, Vantaa 1999.

Underwood, C. P. 1999. HVAC control systems, Modelling, analysis and design. E & FN Spon, an imprint of Routledge, London & New York 1999.

Virgone, Joseph ja Fraisse, Gilles. 2001. Optimisation of Intermittent Heating: Experimental Results of a New Remote Controller. 7<sup>th</sup> Rehva World Congress, Clima 2000, Napoli 2001.

Virtanen, Markku (tutkimusohjelman johtaja). 1999. RAKET (Rakennusten energiankäytön tutkimusohjelma) Loppuraportti. VTT rakennustekniikka, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo 1999.

## **WWW-sivut**

[http://www.coba-group.com/index\\_fi.shtml/](http://www.coba-group.com/index_fi.shtml/) - COBA-arkkitehtuurin esittelysivut

<http://www.control.hut.fi/Kurssit/AS-74.114/> - Tietokonemallintamisen kurssi TKK:lla

<http://www.ehsa.com/> - European Home Systems Association

<http://www.eiba.com/> - European Installation Bus Association

<http://www.heikkinen-komonen.fi/> - Arkkitehtitoimisto Heikkinen-Komonen

<http://www.lonix.fi/> - Lonix Oy

<http://www.motiva.fi/> - Motiva Oy

<http://www.rakli.fi/> - Suomen toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI ry

<http://www.vallox.fi/> - Vallox Oy

<http://www.trnsys.com/> - Thermal Energy System Specialists

## **Liite 1: Oppivan algoritmin liittäminen Lintulahdenkuja 6:n avotoimistotilaan – toimintaselostus**

### **Toimintaympäristö**

RUSE-projektissa (Rakennusten uudet säätö- ja energianhallintaratkaisut) kehitetyn oppivan sisäilman lämpötilaa ja ilmavirtaa ohjaavan algoritmin sovellusalue Lintulahdenkuja 6:ssa sijaitsevassa saneerattavassa rakennuksessa on avotoimistotila 3. kerroksessa. Rakennus on tällä kohtaa L-kirjaimen muotoinen ja ”L”:n pidemmät sivut ovat noin 45 m ja 36 m pitkiä. Sisäpihan puolen julkisivu on lasia, ulkopuolen tiiliseinää. Tilassa on useita sermeillä toisistaan erotettuja työpisteitä keskikäytävän molemmin puolin. Tilan bruttoala on 1281 m<sup>2</sup>.

Tilassa on ilmalämmitys ja -jäähdytys, joka on toteutettu puhallinkonvektoreilla. Konvektoreissa kierrätetään vettä, joten niiden lämmönluvutusta ohjataan venttiileillä. Jokaiseen työpisteeseen liittyy yksi tai useampi puhallinkonvektori, jotka jälkimmäisessä tapauksessa on kytketty toimimaan rinnakkain siten, että tilan lämpötilan asetusarvo johdetaan kaikille saman tilan konvektoreille. Konvektoriverkoston lämmönlähteenä on kaukolämpö. Jäähdytystä tuotetaan sekä koneellisesti (kompressorilla) että vapaa-jäähdyksellä.

### **Algoritmin toimintaperiaatteet**

Algoritmi voi ohjata sekä sisäilman lämpötilaa että ilmavirtoja. Asetusarvojen muuttaminen perustuu läsnäolotiedon perusteella tehtäviin päätelmiin. Opittuaan tilan käyttäytymisen, algoritmi voi muuttaa asetusarvoja siten, että energiaa säästetään silloin, kun tilaa ei käytetä. Olosuhteet kuitenkin palautetaan normaaleiksi ennen käyttäjän saapumista tilaan, jotta viihtyvyys ei laskisi.

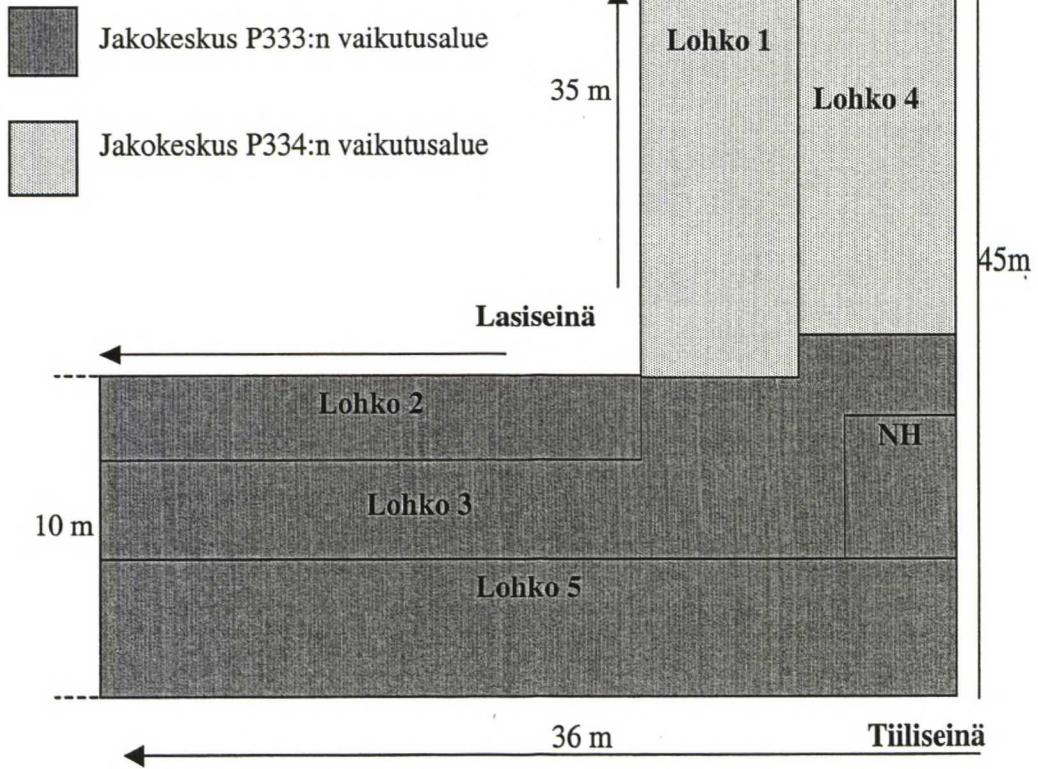


## Säädettävän tilan jako lohkoihin

Lintulahdenkujalla säädettävä tila on iso, joten on järkevää jakaa se pienempiin lohkoihin. Koska algoritmin toimintaan liittyy normaaliolosuhteisiin palauttamiseen kuluva ajan laskenta, pitää säädettävien lohkojen olla dynamiikaltaan samankaltaisia. Järkevä lohkojako olisi sellainen, jossa rakennuksen lasiseinän puoleiset työpisteet, jotka kuuluvat jakokeskus P334:n piiriin (ks. rakennusautomaatiosäätökaavio RAU J6334 tai kuva 41), muodostavat lohkon 1. Lohkoon 2 kuuluvat lasiseinän puoleiset jakokeskus P333:n piiriin kuuluvat työpisteet. P333:n vaikutuspiiriin kuuluva keskikäytävän osa muodostaa lohkon 3, P334:n piiriin kuuluva keskikäytävän osa lohkon 4 (käytävä jatkuu tiiliseinään asti) ja tiiliseinän puoleiset P333:n työpisteet lohkon 5. Jokaiseen lohkoon liittyy oma algoritminsa, joka säätää lohkon olosuhteita. Jokaisesta lohkoista tallennetaan yksi läsnäolotieto, joka lasketaan OR-periaatteella lohkon kaikkien läsnäoloantureiden asennoista. Toisin sanoen, jos lohkon yksikin läsnäoloanturi (esimerkiksi yksittäisen työpisteen anturi) antaa tiedon läsnäolosta, on koko lohkon läsnäolotieto tällöin voimassa. Jos puolestaan yksikään lohkon läsnäoloanturi ei havaitse käyttäjiä lohkon alueella, on koko lohkon läsnäolotieto ”ei käyttäjiä”. Jatkossa läsnäolotilaa kuvataan 1:llä ja ”ei käyttäjiä”-tilaa 0:lla. Mikäli joidenkin yksittäisten työpisteiden läsnäolotila on 0, mutta lohkon tila kuitenkin 1, voidaan ne työpisteet, joissa ei ole ihmisiä läsnä, ajaa säästötilaan, jos oletetaan, että työpisteeseen ei ole tulossa ketään ennen koko lohkon säästötilaan menoa.

Edellä kuvattu jako keskuksien perusteella erillisiin lohkoihin johtuu siitä, että keskuksien P333 ja P334 ilmanvaihdesta huolehtivat eri ilmanvaihtokoneet. Lisäksi P333:n ilmanvaihdesta vastaa yhden tuloilmakoneen lisäksi kaksi poistoilmakonetta, kun P334:n alueella toimii yksi tuloilmakone ja yksi poistoilmakone. Kuva 41 esittää yllä kuvattua lohkojakoa. Jakokeskusten vaikutusalueet on merkitty kuvaan eri sävyillä. Rakennus jatkuu molempiin suuntiin katkoviivojen mukaisesti. Neuvotteluhuone ei kuulu säädettäviin lohkoihin, koska sen käyttö epäsäännöllistä. Neuvotteluhuone pidetään säästötilassa aina, kun sitä ei käytetä. Sen lämpötilan asetusarvo pitää huomioida lohkojen 3 ja 5 asetusarvoja laskettaessa.

NH = neuvotteluhuone



*Kuva 41: Säädetävät algoritmin toimintalohkot.*

#### **Ilmastointijärjestelmän toimintatilat**

Rakennusautomaatiopiirustusten toimintaselostusten mukaan ilmastointijärjestelmä voi olla eri toimintatiloissa vallitsevasta ulkolämpötilasta riippuen. Myös algoritmin tulee tunnistaa nämä eri tilat ja toimia järkevästi niiden perusteella. Jos algoritmi tunnistaa järjestelmän eri tilat, se voidaan ohjata käyttämään esimerkiksi joko lämmitys- tai jäähdytystilan ennakkokäyrää, joilta voidaan siis lukea aika, joka kuluu lohkon olosuhteiden palauttamiseksi normaaliksi. Jos ilmastointijärjestelmän tila muuttuu kesken käyttäjien poissaolajakson, algoritmi palauttaa olosuhteet välittömästi normaaleiksi ja keskeyttää dynamiikan oppimisen. Oleellisesti algoritmin toimintaan vaikuttavia ilmastointijärjestelmän tiloja ovat:

- jatkuva lämmitys (kylmillä ilmoilla; talvi),
- jatkuva jäähdytys (lämpimillä ilmoilla; kesä) ja
- edellisten yhdistelmä (esim. päivällä jäähdytys, yöllä lämmitys; syksy/kevät).



Jatkuva lämmitys tarkoittaa sitä, että ensinnäkin poistoilma kierrätetään lämmöntalteenoton kautta mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi tarvittava peruslämpö saadaan kaukolämmöstä, joka siirretään konvektoriverkostoon lämmönsiirtimien kautta. Algoritmin kannalta tässä tilassa lämpötilan asetusarvoa lasketaan, kun lohkon läsnäoloanturit näyttävät nollaa (säästötila). Puhallinkonvektoreiden moottorit pysäytetään, lämpötilan asetusarvoa pienennetään ja sisälämpötilan annetaan laskea. Algoritmi käyttää lämmityksen ennakkokäyrää normaaliolosuhteiden palauttamisaikaa arvioitaessa.

Jäähdytys voidaan jakaa edelleen kahteen tilaan, jotka ovat vapaa- ja koneellinen jäähdytys. Kylmänä vuodenaikana jäähdytyslaitteiden tuloilmakoneelle ja konvektoriverkostoon tuottama kylmä vesi jäähdytetään nestejäähdyttimien ja niin sanottujen vapaajäähdytyslämmönsiirtimien avulla. Kesällä jäähdytys tehdään jäähdytyskoneiden kompressoreilla. Siirtymisen tilasta toiseen aiheuttaa ulkolämpötilan muuttuminen määrättyjen lämpötilojen ympäristössä. Kesäkäytölle (kompressorijäähdytys) siirrytään, kun ulkolämpötila nousee yli kesäkäytön asetusarvon, joka on  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Talvikäytölle (vapaa jäähdytys) siirrytään, kun ulkolämpötila laskee alle talvikäytön asetusarvon  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Käyttötilojen välissä on asetettava viive, joka on 1 h. Jäähdytystilassa voidaan käyttää ns. kesä-LTO:a, jossa siis otetaan kylmä talteen, mikäli tuloilman lämpötila ennen jäähdytystä on korkeampi kuin poistoilman. Algoritmin kannalta jäähdytystilassa pitää lohkon lämpötilan asetusarvoa nostaa läsnäolon ollessa 0, jotta jäähdytys estetään. Vapaata jäähdytystä kannattaa kuitenkin käyttää aina, kun siihen on mahdollisuus. Algoritmin tekemät muutokset asetusarvoihin eivät saa estää vapaata jäähdytystä. Algoritmi käyttää jäähdytyksen ennakkokäyrää normaaliolosuhteiden palauttamisaikaa arvioitaessa.

Ilmastointikoneen tilojen määrittelyn yhteydessä on lisäksi huomioitava se, että kesällä voidaan käyttää niin sanottua yöjäähdytystä. Ulkoilman lämpötilan ollessa matalampi kuin rakennuksen sisälämpötila, voidaan jäähdytystilan ollessa aktiivisena yöaikana johtaa ulkoilmaa suoraan kerrokseen. Algoritmin kannalta yöjäähdytyksellä ei ole merkitystä, koska algoritmi vain tarkkailee sisälämpötilan ja normaaliolosuhteiden asetusarvon eroa ja aktivoi olosuhteiden palautuksen niiden perusteella.

## Rakennuksen käyttäjien toiminnasta aiheutuvat poikkeustilat

Ilmastointijärjestelmän tilojen lisäksi voidaan määritellä ihmisten käyttäytymisestä johtuvia tiloja, jotka vaikuttavat kokonaisjärjestelmän toimintaan. Tällaisia ovat:

- lomakaudet (etenkin kesä),
- pyhäpäivät ja
- siivoojien ja vartijoiden oleskelu rakennuksessa.

Algoritmin tulee voida muuttaa tilaansa ihmisten loma-aikojen mukaan. Kaikki lomakaudet, jotka aiheuttavat huomattavan muutoksen rakennuksen käyttöasteeseen normaalikäyttöön verrattuna, tulee toteuttaa omina tiloinaan. Esimerkiksi kesälomakauden aikana läsnäolotiedot poikkeavat muun vuoden vastaavista merkittävästi. Kesälomakauden voidaan määrätä alkavan 1.6. ja päättyvän 31.8. Tämän jakson läsnäolotiedot tallennetaan omaksi tietokannakseen, jotta nämä tiedot eivät sotke muun vuoden läsnäolotietoja. Kesälomajakson aikana viikkorytmi voi olla algoritmin läsnäolon oppimisen kannalta liian hidas, koska kesällä tyypillisesti joku lähtee viikon vaihtuessa lomalle ja joku toinen palaa. Peräkkäiset viikot ovat harvoin samankaltaisia tilojen käytön suhteen. Tämän takia kesäjakson aikana kannattaa tarkkailla joka viikon maanantaina lohkojen läsnäoloa ja tehdä tämän perusteella päätelmät loppuviikon (arkipäivien) toiminnasta. Algoritmi ottaa kuitenkin mahdollisesti muuttuvat läsnäolotilat huomioon loppuviikonkin aikana. Kesälomaviikoilla tehdään siis enemmän vertailua saman viikon edeltäviin arkipäiviin kuin edellisen viikon päiviin. Algoritmin toiminta kesäjakson viikonloppujen aikana puolestaan toteutetaan vertailemalla läsnäoloa edellisiin viikonloppuihin.

Pyhäpäivien kohdalla algoritmin läsnäolon tallennus kannattaa estää, jotta yksittäinen, keskellä viikkoa oleva pyhäpäivä ei sotke pidemmän ajan läsnäolotrendejä. Pyhäpäivät voidaan ohjelmoida järjestelmään ja näinä päivinä algoritmi ei tallenna läsnäolotietoja, koska toiminta rakennuksessa on normaalista poikkeavaa. Pyhäpäivinä algoritmi ylläpitää läsnäolotilaa 0 vastaavat olosuhteet, kunnes lohkoon saapuu käyttäjiä. Toisin sanoen olosuhteiden palautusta ei tehdä, koska oletetaan, ettei lohkoon ole tulossa ketään. Jos käyttäjän läsnäolo havaitaan, lohkon olosuhteet ajetaan normaaleiksi.



Vartijoiden liikkeet rakennuksessa havaitaan käytävillä olevien läsnäoloantureiden tilan vaihtuessa "epätavalliseen" aikaan. Läsnäoloa tarkkailevaan osaan algoritmia tulee liittää logiikka, joka tarkkailee läsnäolotilan 1 kestoa. Mikäli jonkin tilan läsnäolon havaitaan pysyvän aseteltavan viiveen (esimerkiksi 5 minuuttia) ajan 1:ssä, läsnäolotieto kirjataan ja sen perusteella ajetaan järjestelmä tarvittaessa tilasta toiseen. Viivettä voidaan muuttaa kellonajasta ja viikonpäivästä riippuen (samaa tekniikkaa voitaisiin soveltaa valaistuksen säädössä). Siivoojien kohdalla voidaan soveltaa myös aseteltavaa viivettä, mutta käytännön toteutus riippuu siivoojien työajasta, jonka perusteella algoritmin järkevä toiminta voidaan suunnitella. Esimerkiksi, jos siivoojat työskentelevät välittömästi tavanomaisen työajan päätyttyä (klo: 16 - 17 jälkeen), ei siivoojia voida identifioida läsnäolotietojen perusteella. Toisaalta, jos siivous tapahtuu vasta myöhään illalla, voidaan päätellä läsnäoloantureiden aktivoitumisen johtuvan juuri siivouksesta. Periaatteessa olosuhteet rakennuksessa eivät saa olla huonot siivouksen aikana, koska siivous edellyttää jatkuvaa, pitkäaikaista oleskelua rakennuksessa. Tämä on huomioitava algoritmin käyttöönottovaiheessa.

### **Algoritmin implementoinnista**

Koska lohkojen läsnäolotietoa voidaan käyttää muutenkin hyväksi kuin pelkästään lämpötilan ja ilmavirran ohjauksen yhteydessä, on järkevää tallentaa jokaisen läsnäoloanturin tiedot tietokannaksi, josta kukin "älykäs" algoritmi voi saada tarvitsemansa lohkon tai työpisteen tiedot. Tietokanta voisi tuottaa lisäksi automaattisesti tiedon kunkin lohkon läsnäolotiedosta, OR-ehto huomioon ottaen. Tällöin koko lohkon läsnäolon tilasta saadaan yksi tieto, jota myös kaikki erilliset algoritmit voivat hyödyntää.

Perusalgoritmi voidaan toteuttaa omana moduulinaan, jonka toteutuksessa huomioidaan ilmastointikoneen ja käyttäjien eri toimintatilat. Käyttäjien toiminnasta johtuvat poikkeustilat voidaan ottaa huomioon läsnäolomodulissa, koska algoritmi ei välttämättä tarvitse tietoa siitä, onko kesäloma tai pyhäpäivä. Mikäli läsnäolomodulin antama heräte algoritmille on sopiva, voidaan algoritmia ohjata näillä herätteillä toimimaan oikein ilman tietoa käyttäjien toimintatiloista. Algoritmille riittää tiedot työpisteiden läsnäolotiloista ja näihin liittyvistä odotettavista työpisteisiin saapumisajoista.

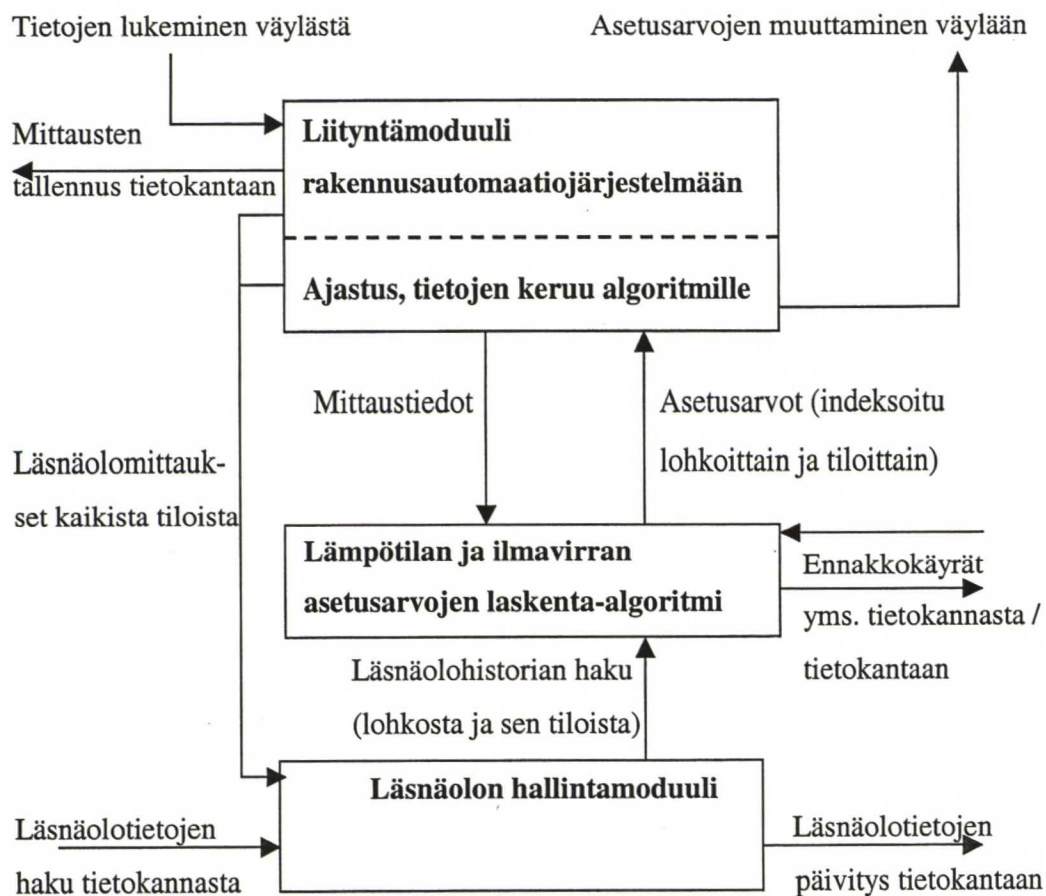
Algoritmin pitää ottaa huomioon ulkolämpötilan lisäksi lohkon ympärillä vallitsevat lämpötilat. Koska säädettävä tila on avotoimisto, seiniä ei ole ja lohkojen välillä on vain sermit. Lämpö pääsee siirtymään melko vapaasti lohkosta toiseen, joten yksittäisen lohkon lämpötilaa ei kannata poikkeuttaa paljoa viereisen lohkon lämpötilasta. Lohkot voisivat olla riippuvaisia toistensa toiminnasta siten, että algoritmin yksi parametri, pudotus, joka kertoo kuinka paljon lämpötilan asetusarvoa nostetaan tai lasketaan säästötilassa, muuttuisi lohkoa ympäröivien muiden lohkojen lämpötilojen asetusarvojen mukaan. Jos lohkoa ympäröivät muut lohkot ovat myös säästötilassa, pudotus voi olla maksimissaan (esimerkiksi 4 °C). Jos ympäröivissä lohkoissa kuitenkin oleskellaan, pitää pudotuksen olla pienempi (esimerkiksi 2 °C).

### **Ohjelmoinnin moduulijako**

Kaikki lohkoihin liittyvä pitää jollain tavoin indeksoida siten, että algoritmi saa oikeasta lohkosta läsnäolotiedot, ennakkokäyrät jne, ja ohjaukset tehdään niiden perusteella samaan lohkoon. Algoritmin yläpuolelle voidaan ohjelmoida moduuli, joka kerää tiedot rakennusautomaatiojärjestelmästä (RAU-järjestelmä) sekä läsnäolotietokannasta, syöttää tiedot algoritmille ja toimittaa algoritmin tuottamat asetusarvot ilmastointilaitteille. Jokaisen lohkon tiedot kerätään ja syötetään vuorollaan algoritmille. Asetusarvojen laskentaväliä pitää voida muuttaa, mutta alkuarvoksi käy 10 minuuttia. Algoritmin laskemat asetusarvot syötetään RAU-järjestelmän liityntämoduulista tilakohtaisille algoritmeille.

Ohjelmoinnin moduulijako ja ohjelmointimoduulien väliset liitännät on esitetty kuvassa 42. Järjestelmästä voidaan erottaa seuraavat osat:

- liityntämoduuli RAU-järjestelmään,
- lämpötilan ja ilmavirran asetusarvon laskenta-algoritmi ja
- läsnäolon hallintamoduuli.



*Kuva 42: Ohjelmoinnin moduulijako ja moduulien väliset liitännät.*

Kuvassa 42 moduulien väliset liitännät on merkitty nuolilla. Nuolen suunta kuvaa informaation kulkusuuntaa. Nuoliin liittyy seloste, jossa kuvataan moduulien välisen liikenteen informaatioisisältö. Kuvan 42 mukaan eri moduuleilla on seuraavat tehtävät:



### Liityntämoduuli RAU-järjestelmään

- kerää mittausdatan RAU-järjestelmästä (tai tietokannasta) ja tallentaa mittaukset tietokantaan (ellei tätä ole toteutettu jo muualla järjestelmässä)
- syöttää algoritmin laskemat asetusarvot RAU-järjestelmään
- toimittaa läsnäolotiedot kaikista työpisteistä läsnäolon hallintamoduulille (ajastettu toiminto)
- kerää asetusarvojen laskentahetkellä mittaustiedot säädettävästä tilasta (ja sen ympäristöstä) ja kutsuu algoritmia (ajastettu toiminto)
- hoitaa laskennan ajastuksen, tilojen indeksoinnit jne.

### Lämpötilan- ja ilmapirran asetusarvojen laskenta-algoritmi

- hakee säätölohkoa ja -tilaa vastaavat ennakkokäyrät tietokannasta
- lähettää pyynnön läsnäolon hallintamoduulille hakea säädettävän tilan läsnäolohistoria tietokannasta; historian perusteella arvioidaan asetusarvojen muutosmahdollisuudet ja -tarpeet
- syöttää lasketut asetusarvot RAU-järjestelmän liityntämoduuliin
- voi ohjata lohkon tilat eri asetusarvoihin (jos ollaan menossa kohti säästötilaa ja lohkon läsnäolo on 1, mutta tilan läsnäolo 0 eikä tilaan ole tulossa enää käyttäjiä ennen koko lohkon säästötilaan ajoa => tila voidaan ajaa säästötilaan ennen muuta lohkoa)
- tallentaa säätölohkoa vastaavat ennakkokäyrät tietokantaan, jos käyrät ovat muuttuneet laskennan aikana

### Läsnäolon hallintamoduuli

- hakee algoritmin tarvitsemat läsnäolotiedot tietokannasta
- päivittää tietokantaan RAU-järjestelmän toimittamat läsnäolotiedot kaikista tiloista ja lohkoista